

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE MEJORA A BOMBA MULTI-ETAPA DE PLANTA COKER
PARA EMPRESA DEL RUBRO PETROQUÍMICO.

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno: José Ignacio Silva Salinas
Profesor Guía: Mg. Ing. Pablo Andrés Duque
Ramírez



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Propuesta de mejora a bomba multi-etapa de planta coker para empresa del rubro petroquímico

Nombre del candidato(a): José Ignacio Silva Salinas

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento industrial

Campus: Viña del Mar ; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Andrés Duque Ramírez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22/07/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 22/07/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

El presente proyecto de titulación llamado “Propuesta de mejora a bomba multi-etapa de planta coker para empresa del rubro petroquímico.”, se enfoca en los problemas recurrentes encontrados en las bombas centrífugas de la Refinería Aconcagua de ENAP, específicamente en el sistema que absorbe gases de hidrocarburos.

Estas bombas sufren fallas constantes en sus sellos mecánicos resultando en interrupción operativa de hasta 32 horas y provocando impactos adversos en la continuidad del trabajo diario; así como también incrementando los costos y afectando la seguridad ambiental.

El análisis implica la identificación de las bombas más críticas a través de gráficos de dispersión logarítmica y evaluaciones de modos y efectos de fallas críticas (FMECA), junto a un examen de causa raíz (RCA).

El resultado del análisis reveló que el 30 % de los fallos se originan por una instalación incorrecta de los sellos mecánicos, este dato lo revela el proveedor, ya que este último es el único autorizado para realizar las mantenciones de los equipos, lo que demuestra la importancia de poder realizar una formación técnica a los trabajadores. Esta estrategia de mantenimiento busca poder mejorar la confiabilidad del sistema, disminuir los gastos operativos y la eficiencia en el tiempo de reacción.

La factibilidad económica de esta propuesta indica que los costos asociados comparando en comprar sellos mecánicos nuevos vs la reparación de estos indican que un nuevo sello mecánico tiene un valor aproximado de 640,7 UF, mientras que las reparaciones tienen valores que oscilan entre 228 a 457 UF, reflejando la importancia de la implementación de la propuesta.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS GENERAL..... 2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

1. CAPITULO I: MARCO TEORICO 4

1.1. Antecedentes Generales 4

1.2. Instalaciones..... 5

1.3. Información Del Proceso Productivo..... 5

1.4. Problemática 6

1.5. Alcances Y Limitaciones 8

1.6. Herramienta De Jerarquización..... 9

1.6.1. Historial de fallas 9

1.6.2. Determinación de equipo crítico..... 10

1.6.3. Diagrama de dispersión logarítmica. 11

2. CAPÍTULO II: ANALISIS DE MODO, EFECTO Y DE FALLA 15

2.1. Análisis De Modo, Efecto y De Falla 15

2.2. Descripción Del Equipo..... 16

2.3. Descripción Del Sello Mecánico 18

2.4. Planos De Aplicación API 20

2.5. Análisis SIPOC 24

2.6. Modos De Fallas 26

2.7. FMEA 26

3. CAPITULO III: EVALUACIÓN TÉCNICA 33

3.1. Costos De Mantenimiento..... 33

3.2. RCA 34

3.2.1. Hipótesis 1 35

3.2.2. Hipótesis 2 37

3.2.3. Hipótesis 3 38

3.3. Plan De Implementación..... 44

3.3.1. Fases de Implementación..... 45

3.3.2. Roles y Responsabilidades..... 45

3.4. Monitoreo Y Evaluación..... 49

RECOMENDACIONES PARA MEJORA CONTINUA 51

CONCLUSIONES 52

4. Bibliografía 54

Anexos 55

ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1-1. Ubicación geográfica de ENAP refinería Aconcagua.....	5
Ilustración 1-2 <i>Configuración de bombas</i>	7
Ilustración 1-3. Diagrama de dispersión logarítmica Coker.....	12
Ilustración 2-1 <i>Bomba multietapa modelo KSMK</i>	16
<i>Ilustración 2-2 Bomba en corte</i>	17
Ilustración 2-3 <i>Sello mecánico John Crane 609</i>	19
Ilustración 2-4 <i>Datos dimensionales de sello 609</i>	20
Ilustración 2-5 <i>Principio termosifón</i>	21
Ilustración 2-6 <i>Plan API 52</i>	22
Ilustración 2-7 <i>Plan API 52</i>	22
Ilustración 2-8 <i>Enfriador plan API 21</i>	23
Ilustración 3-1 <i>Diagrama Hipótesis 1</i>	35
Ilustración 3-2 <i>Diagrama hipótesis</i>	37
Ilustración 3-3 <i>Diagrama hipótesis 3</i>	38
Ilustración 3-4 <i>Bosquejo de check list adaptado para inspección de bomba J300</i>	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Histórico de reparaciones de Bomba J3007A.....	9
Tabla 1.2 Cálculo del MTTR.....	10
Tabla 2.1 Modelo SIPOC.....	25
Tabla 2.2 <i>Rango de severidad</i>	27
Tabla 2.3 <i>Rango de ocurrencia</i>	28
Tabla 2.4. <i>Rango de detención</i>	29
Tabla 2.5 <i>Rango de detención</i>	29
Tabla 2.6. FMECA.....	30
Tabla 3.1 Costos de mantenimientos y valor sello nuevo.....	33
Tabla 3.2 <i>Costo total anual de cambio de sellos mecánicos</i>	43
Tabla 3.3 <i>Costo total anual de horas hombre por cambio de sello mecánico</i>	44
Tabla 3.4 <i>Checklist propuesta</i>	47
Tabla 3.5 <i>Plan de actividades</i>	48

Siglas y Simbología

BB2: Between Bearing (Entre cojinetes o rodamientos), referencia la forma constructiva de una bomba de 2 etapas.

API: American Petroleum Institute (API: Instituto Americano del Petróleo)

API 610: Centrifugal Pumps Standard for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries (Estándar para Bombas Centrífugas para Industrias del Petróleo, Petroquímica y Gas Natural)

RCM: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

FMECA: Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de fallas.

AMEF: Análisis de modo y efecto de fallas.

RPM: Revoluciones por Minuto

MTTR: Tiempo Medio de Reparaciones.

m³/d: Metro cúbico por día.

k/cm³ kilogramo por centímetro cuadrado

kW Kilowatt

°C: Grados Celsius

ISO: Organización Internacional de Normalización

PSI: Libras por pulgadas cuadradas

MPa: Megapascal

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de titulación, titulado “Propuesta de mejora a bomba multi-etapa de planta Coker para empresa del rubro petroquímico”, se enfoca en la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP ACONCAGUA), una empresa importante en la industria petroquímica de nuestro país que se dedica a procesos de refinación. En sus funciones, el traslado de nafta y el procedimiento de Coker son etapas críticas, siendo importantes para la distribución de energía para el sector termoeléctricas, es en este punto donde las bombas son fundamentales para la operación de la planta, sin embargo, estas presentan fallas recurrentemente específicamente en sus sellos mecánicos, lo que genera interrupciones en la operatividad de hasta 32 horas por evento detectado, lo que incrementa los costos y afecta la sostenibilidad operacional.

Esta problemática es crucial poder abordarla de manera integral, mediante una implementación de mejoras en las estrategias de mantenimiento y operaciones, con el fin de poder optimizar la confiabilidad del sistema.

El objetivo principal de este estudio es proponer mejoras al subsistema de absorbedor de gases de hidrocarburos mediante técnicas de mantenimiento centrado en confiabilidad, mejorando la disponibilidad del activo, para esto se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el activo crítico mediante jerarquización por diagrama de dispersión logarítmica seleccionando equipos a estudiar.
- Analizar los modos de fallas críticas que afectan la función principal del equipo, utilizando la metodología de análisis de modo, efecto y criticidad de fallos (FMECA), para proponer mejoras técnicas y así optimizar el rendimiento del equipo.
- Efectuar un análisis de causa raíz (ACR) de los modos de fallas críticas, evaluando las propuestas desde una propuesta técnica y económica, y así de identificar soluciones viables que disminuyan las fallas.

Para llevar a cabo esta propuesta se rige mediante la metodología planteada, la cual incluye un análisis FMECA el cual permitirá identificar los modos de falla más críticos, luego se aplica un análisis de causa-raíz, el cual identificará cuáles son las causas de las fallas y posteriormente se realiza una propuesta con su factibilidad económica.

El alcance de este trabajo se centra en el subsistema de absorción de gases de hidrocarburos, específicamente en las bombas J-3007 A y B, cuyos problemas recurrentes impactan directamente en la operación de la Refinería Aconcagua. A través de esta propuesta, se espera no solo mejorar la confiabilidad de los equipos, sino también reducir los costos operativos garantizando una operación más eficiente.

OBJETIVOS GENERAL

Proponer mejoras al subsistema de absorbedor de gases de hidrocarburos mediante técnicas de mantenimiento centrado en confiabilidad, mejorando la disponibilidad del activo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el activo crítico mediante jerarquización por diagrama de dispersión logarítmica seleccionando equipos a estudiar.
- Analizar los modos de fallas críticas que afectan la función principal del equipo, utilizando la metodología de análisis de modo, efecto y criticidad de fallos (FMECA), para proponer mejoras técnicas y así optimizar el rendimiento del equipo.
- Efectuar un análisis de causa raíz (ACR) de los modos de fallas críticas, evaluando las propuestas desde una propuesta técnica y económica, y así de identificar soluciones viables que disminuyan las fallas.

CAPÍTULO 1:
Información y contextualización de activos críticos en planta Coker

1. CAPITULO I: MARCO TEORICO

1.1. Antecedentes Generales

La Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), empresa estatal chilena, desempeña un papel crucial en el sector energético del país, enfocándose en la exploración, producción, refinación y comercialización de hidrocarburos. ENAP opera varias refinerías, incluyendo la Refinería Aconcagua, ubicada en la comuna de Concón, Región de Valparaíso. Esta refinería, que fue inaugurada el 12 de noviembre de 1955 bajo el nombre de Refinería de Petróleo Con-Con (RPC), cambió su nombre en 2004 tras una fusión con Petrox, y actualmente tiene una capacidad instalada para procesar (destilar) 102,000 barriles de petróleo crudo por día. Además, cuenta con una dotación de aproximadamente 783 personas, y produce la mayor parte de los combustibles que consume la Región Metropolitana de Santiago (ENAP, 2024).

ENAP también opera otras dos plantas de refinación en Chile: una en la Región del Biobío, en Hualpén, y otra en la Región de Magallanes, en Punta Arenas. La gerencia de refinación y comercialización de ENAP también gestiona cinco terminales marítimas distribuidos a lo largo del país, a través de los cuales realiza importaciones y exportaciones de productos y crudo. Estos terminales están ubicados en Quintero (Región de Valparaíso) Siendo el más importante a nivel nacional y cumple un rol fundamental en las operaciones de la empresa, este terminal fue creado en 1954 con el propósito de recepcionar, cargar, almacenar y preparar productos, tales como gasolina, diesel, kerosenes, gas licuado, y petróleo crudo, este último como materia prima de todos los productos anteriores en este terminal se recibe la totalidad del crudo que es procesado en refinería Aconcagua mensualmente, recibe y entrega 700 mil m³ de productor y petróleo crudo para cumplir con las metas este terminal cuenta con una moderna infraestructura de almacenamiento que le permite almacenar petróleo crudo y productos derivados del petróleo, además cuenta con un moderno sistema de operación y control los que se suman a un sistema de oleoductos que lo conectan con la refinería y que permiten al terminal la transferencia de crudo y productos, además ENAP cuenta con otros terminal a lo largo del país que son, San Vicente (Región del Biobío), y tres en la Región de Magallanes: Cabo Negro, Gregorio y Clarencia, con una capacidad total de almacenamiento de 1,000,000 metros cúbicos de crudo (ENAP Aconcagua, 2023).

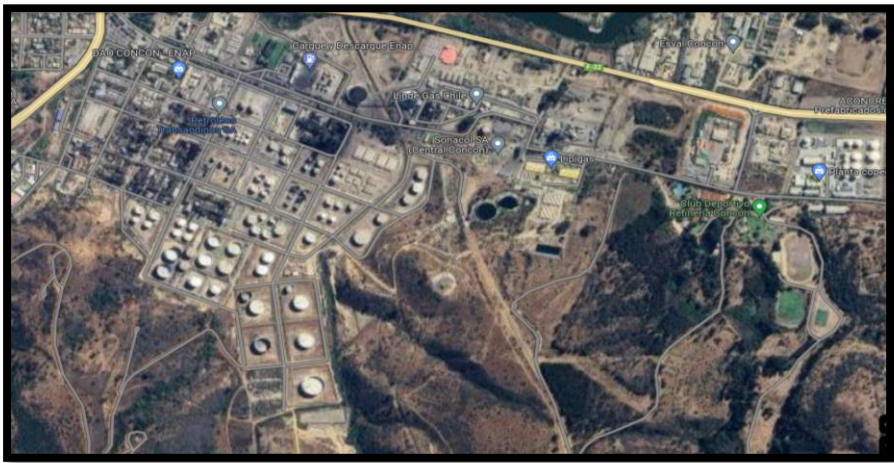
El análisis de fallas en estos componentes, a través de métodos como el análisis de modos de falla y efectos críticos (FMEA), es relevante para optimizar las operaciones y reducir costos. Esto tiene una incidencia en la seguridad y acatamientos de las regulaciones del entorno ambiental La confiabilidad de estos sistemas es fundamental para evitar emisiones incontroladas y proteger el medio ambiente, garantizando la sostenibilidad operativa de ENAP (Ns Energy, 2021).

La relevancia de este estudio no se limita a su impacto directo en la operación de la planta, sino que también contribuye a la seguridad y al cumplimiento de normativas ambientales, ya que los sellos mecánicos son componentes cruciales para evitar emisiones incontroladas de gases o líquidos peligrosos. Optimizar su mantenimiento no solo tiene implicaciones económicas, sino también un profundo impacto en la sostenibilidad y seguridad operativa de las instalaciones de ENAP (ENAP, 2024; ENAP Aconcagua, 2023; SEPCO, 2023).

1.2. Instalaciones

La Refinería Aconcagua de ENAP se ubica a 132 km al norte de Santiago, en las costas de la V región de Chile, a nivel del mar. Esta planta procesa alrededor de 104.000 barriles diarios de crudo, lo que le permite abastecer una gran parte de los combustibles requeridos por la capital. Además, cuenta con 16 procesos de refinación, que permiten obtener una variedad de productos derivados del petróleo, asegurando una producción eficiente y diversificada para satisfacer la demanda local.

Ilustración 1-1. Ubicación geográfica de ENAP refinería Aconcagua



Fuente: Google Maps

1.3. Información Del Proceso Productivo

En esta división, las principales plantas de procesamiento de crudo y cargas son: Topping 1 y 2, Cracking catalítico, Reformación continua, West Gas Scrubber, Hidrocracking suave (2 plantas), Hidrodesulfurización de Diesel y gasolina, Alquilación, Planta de solventes, Planta de ácido sulfúrico, Planta de isomerización, Planta DIPE, Planta de azufre, Planta de hidrógeno, Complejo de coquización retardada COKER, Planta cogeneradora.

También incluye instalaciones para la Coquización Retardada (Coker), que desempeña una función fundamental en la transformación de residuos pesados en productos valiosos, como gases combustibles, nafta, diésel y coque de petróleo. Este proceso, basado en el cracking térmico, utiliza

hornos que operan a temperaturas de alrededor de 350 °C para romper los enlaces carbono-carbono en las moléculas de hidrocarburos, alimentando dos cámaras alternadas: una destinada a la reacción del material durante 24 horas, mientras la otra se utiliza para la descarga de coque mediante corte con agua a alta presión.

La refinería también cuenta con instalaciones de apoyo, como tanques de almacenamiento con capacidad de 800 metros cúbicos para productos refinados como queroseno de aviación, gasolina y diésel. Además, cuenta con plantas de tratamiento de gases y aguas residuales, un sistema cerrado de agua de enfriamiento, y una conexión directa con la Terminal Marítima de Quintero, lo que facilita el transporte de productos.

Por último, sus sistemas de seguridad y soporte incluyen un Laboratorio Químico, una Brigada de Respuesta a Emergencias, y un Cuartel de Bomberos 24/7, además de generadores de energía de emergencia y talleres para mantenimiento. Estas características posicionan a la Refinería Aconcagua como un elemento estratégico en la cadena de suministro energético de Chile (ENAP, 2024).

1.4. Problemática

Las bombas J-3007 A y B de la Refinería Aconcagua de ENAP enfrentan desafíos operativos específicos que comprometen su desempeño. Estos problemas no solo afectan su eficiencia, sino también la continuidad del proceso de refinación. A continuación, se explica de manera sencilla las razones detrás de estas dificultades.

Razones de la problemática: Fluctuaciones en condiciones de operación: Estas bombas están diseñadas para trabajar bajo condiciones de alta presión y temperatura, pero en la práctica, las fluctuaciones constantes en estos parámetros generan un estrés adicional en sus componentes, especialmente en los sellos mecánicos. Los sellos están fabricados para mantener un cierre hermético, pero los cambios bruscos en la presión o temperatura los someten a fuerzas que aceleran su desgaste.

Impacto del entorno marítimo: La refinería está ubicada en una zona costera, donde el aire salino actúa como un catalizador natural de corrosión. Incluso los sellos mecánicos avanzados, como los de tipo fuelle metálico, que están diseñados para soportar ambientes agresivos, se ven afectados por la exposición prolongada al entorno marino. Este desgaste no solo aumenta las posibilidades de fugas, sino que también acorta la vida útil de las bombas.

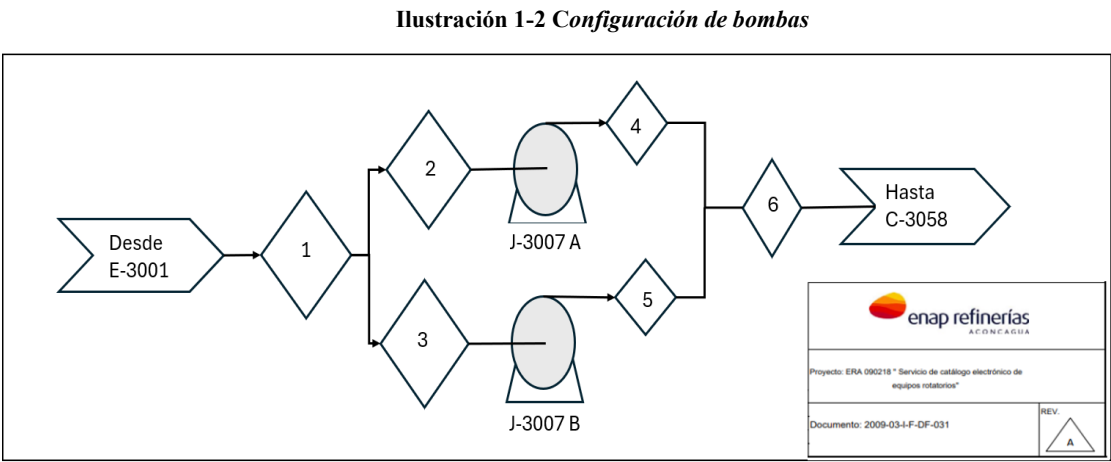
El esfuerzo por variaciones en el flujo de crudo: Las bombas J-3007 A y B manejan crudo con características variables, como viscosidad y en algunos casos composición química, dependiendo de las fuentes de suministro. Estas variaciones provocan que las bombas trabajen fuera de los parámetros establecidos por el fabricante, aumentando la fricción y el desgaste de sus componentes prematuramente.

Mantenimiento y residuos en el sistema: A pesar de que se realizan mantenciones, los residuos acumulados en los filtros y tuberías obstruyen el sistema, forzando a las bombas a operar a mayores presiones de trabajo. Esto incrementa la presión en los sellos y a las piezas móviles, provocando fallas más frecuentes.

Estas bombas no solo son esenciales para la continuidad del proceso de refinación, sino que cualquier falla en ellas puede generar fugas de productos, pérdidas económicas y un impacto ambiental considerable debido a la liberación de gases o líquidos. Además, los costos asociados a reparaciones y reemplazos son altos.

Entre las posibles soluciones tenemos:

- Implementar sistemas de monitoreo continuo para detectar cambios de presión o temperatura en tiempo real.
- Aplicar recubrimientos especiales en los componentes metálicos para resistir mejor la corrosión marina.
- Optimizar el mantenimiento preventivo y asegure que los filtros se limpien regularmente para evitar obstrucciones.



Fuente: Apunte departamento mecánico ENAP.

El análisis del flujo de operación, representado en el diagrama, destaca la importancia de cada componente en la producción y evidencia la necesidad de un mantenimiento proactivo para evitar fallas que puedan afectar a la operación de la planta.

La adopción de soluciones basadas en materiales resistentes a la corrosión y la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo se ve como las acciones más efectivas para ayudar a los problemas identificados y asegurar un funcionamiento óptimo a largo plazo.

En resumen, el problema de investigación se centra en cómo las condiciones operativas y ambientales adversas están afectando la vida útil y la eficiencia de los sellos mecánicos en la Refinería Aconcagua de ENAP. Este estudio plantea la siguiente pregunta central de investigación: ¿Cómo se pueden identificar y mitigar las causas de fallas recurrentes en los sellos mecánicos y otros componentes críticos del subsistema de absorbedor de gases de hidrocarburos en la Refinería Aconcagua de ENAP, y qué estrategias de mantenimiento centrado en confiabilidad pueden implementarse para mejorar la disponibilidad del activo y la eficiencia operativa

1.5. Alcances Y Limitaciones

La investigación se centró en el subsistema recoger de gases hidrocarburos de la Refinería Aconcagua de ENAP, sobre todo en las bombas J-3007 A y J-3007 B, con sus respectivos sellos mecánicos. Por tal razón, se llevó a cabo una valoración minuciosa con el fin de detectar errores significativos que malogran el funcionamiento de estas máquinas. Así, se utilizaron instrumentos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el análisis de modos de falla y efectos (FMEA), el diagrama de dispersión logarítmica y el análisis de causa raíz (RCA).

No obstante, hubo limitaciones técnicas que pudieron incidir en los hallazgos, como la disponibilidad y exactitud de la información histórica de la operatividad y la manutención de estas bombas y sellos. Esto puede interrumpir un examen precioso de los errores. Del mismo modo, hay elementos medioambientales en el área de estudio (salitre y corrosión) que impiden la sostenibilidad de estas intervenciones de optimización.

Asimismo, el factor monetario es otro limitante, dado que las alternativas precisadas tienen que ser acordes con la viabilidad económica asignada por ENAP, si esto no es así, se afecta la acción de implementación de mejoras, sobre todo las que solicitan tecnologías avanzadas. Por otro lado, depender de expendedores ajenos a la empresa podría ocasionar demoras en la cadena de suministro. Esto se mezcla con la temporalidad y los materiales que están al alcance para llevar a cabo las soluciones, lo que obliga a priorizar procesos de otros.

1.6. Herramienta De Jerarquización

Los instrumentos para priorizar activos (análisis de criticidad) posibilitan la jerarquización para valorar y categorizar los activos en relación con los previsibles errores y su incidencia en las funciones, lo que permite a las empresas anticiparse a las fallas y prever en que sector designar los materiales para trabajar en los errores. Por lo tanto, un examen de criticidad usualmente supone la recolección de información alrededor del desempeño de los activos y los accidentes de errores, lo que posibilita sustituir o conservar activos que disminuyen la falta de funcionalidad de los equipos. Esto garantiza que los activos críticos reciban la atención necesaria para evitar interrupciones que podrían afectar la seguridad, la eficiencia operativa o el desempeño financiero.

Esto ayuda a crear una estrategia para mantener o reemplazar activos de una manera que minimice el tiempo de inactividad y el costo. Además, proporciona información sobre los posibles modos de falla y permite a los equipos desarrollar estrategias de mitigación que mejoren la confiabilidad y el rendimiento de los activos (Christiansen, 2024).

1.6.1. Historial de fallas

El historia de fallas es una parte fundamental en el estudio y para el cálculo del diagrama, también este elemento es crucial para la toma de decisiones en un mantenimiento tanto preventivo como correctivo, ya que se pueden analizar patrones y a su vez comportamiento erráticos que puede tener la bomba en este caso ya mencionado esto se le hace énfasis en lo que es su tiempo de reparación o MTTR.

Tabla 1.1 Histórico de reparaciones de Bomba J3007A

Tipo de reparación	Fecha ref.	Denominación
Repara sello J3007A	02/12/2023	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Equipo con ruido, filtración sello J3007A	04/09/2023	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Revisar fuga por sello lado motor J3007A	15/07/2023	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Filtración sello J3007A	12/05/2023	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Revisar sello lado libre J3007A	03/03/2023	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Cambio sellos LL y LA J3007A	07/12/2022	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Revisar perdida sello lado libre J3007A	08/08/2022	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar fuga sello L.L, J3007A	30/06/2022	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Revisar y reparar sello por fuga J3007A	29/04/2022	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Evaluar fuga por sello lado acople J3007A	29/03/2021	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Repara sello por fuga J3007A	25/12/2021	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Repara sello J3007A	22/09/2021	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar sello mecánico J-3007-A	01/07/2021	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar fuga sello	01/03/2021	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar sello norte J-3007-A	11/01/2021	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar fuga por sello mecánico	23/08/2020	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar sello J-3007-A	14/05/2020	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar fuga por sello mecánico	14/03/2020	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A
Reparar sello J-3007-A	11/01/2020	Bomba de Gas OIL (pobre), J3007A

Fuente: Base de datos departamento de mecánica ENAP

Identificación de Problemas Recurrentes: El historial muestra que las fallas en los sellos mecánicos son un problema recurrente, lo que indica, que esta área necesita una revisión detallada en términos de diseño, materiales y/o condiciones operativas. Las reparaciones frecuentes del mismo tipo de falla reflejan falta de soluciones duraderas.

Mejorar las Estrategias de Mantenimiento: Es importante implementar un mantenimiento predictivo que permita identificar problemas antes de que ocurran, especialmente en los componentes críticos como los sellos mecánicos. La combinación de análisis de causa raíz (RCA) y técnicas de monitoreo de condiciones ayudan a reducir la frecuencia de las reparaciones.

Optimización del MTTR: La reducción del tiempo de inactividad a través de mantenimientos más eficientes son esenciales para mejorar la disponibilidad de la bomba.

Causas Subyacentes: El comportamiento errático y las fallas repetidas en los mismos componentes indican que las causas subyacentes deben analizarse más a fondo, revisando las condiciones operativas o los procesos de mantenimiento anteriores, para identificar posibles áreas de mejora.

1.6.2. Determinación de equipo crítico

La identificación del equipo es un proceso fundamental en la gestión del mantenimiento industrial, ya que permite priorizar los recursos y esfuerzos hacia aquellos activos que tienen un impacto directo en la producción y seguridad de la operación. En este caso, la Bomba J3007A, la determinación de su criticidad se debe realizar considerando varios factores clave, tales como el impacto de su falla, su función dentro del proceso productivo, la frecuencia de fallas y los costos asociados.

Tabla 1.2 Cálculo del MTTR

Equipos	Trabajo real	N. FALLAS	MTTR
Fraccionadora de Coker	28	2	14
Bomba J -3007	34	6	5,7
Intercambiador	10	4	2,5
Ventiladores (enfriador)	28	4	7
Absorbedor secundario	20	2	10
	120	18	39,2
	LIMITES	3,6	
	MTTR	6,6667	

Fuente: Elaboración propia

La tabla (1.2) muestra un resumen del rendimiento de varios equipos, donde se destacan el Trabajo Real, número de Fallas (N. FALLAS) y MTTR (Mean Time to Repair)

Fraccionadora de Coker: Este equipo tuvo dos fallas, pero las reparaciones fueron largas, tomando en promedio 14 horas cada vez. Esto es debido a que las reparaciones son complicadas y que podría ser necesario encontrar formas de hacerlas más rápidas.

Bomba J-3007: Aunque este equipo falló seis veces, el tiempo de reparación fue relativamente rápido, con un promedio de 5,7 horas. Lo cual indica que las fallas son reparadas de manera más eficiente, pero el número de fallas es mayor.

Intercambiador: Aunque este equipo falló bastante (4 veces), las reparaciones fueron rápidas, tomando solo 2,5 horas en promedio, lo que relativamente es eficiente en cuanto a tiempos de reparación.

Ventiladores (enfriadores): Este equipo falló cuatro veces y sus reparaciones fueron algo más rápidas que las de la fraccionadora, con un promedio de 7 horas de reparación.

Absorbedor Secundario: Este equipo solo tuvo dos fallas, pero sus reparaciones fueron más largas, tomando en promedio 10 horas.

1.6.3. Diagrama de dispersión logarítmica.

El diagrama de dispersión logarítmica es una herramienta utilizada en el análisis de mantenimiento para evaluar la criticidad de equipos y sistemas mediante la relación entre la frecuencia de fallas y el tiempo medio entre reparaciones (MTTR). Este enfoque permite priorizar la atención en activos críticos al representar gráficamente datos relevantes, como la cantidad de fallas y su impacto en los costos operativos y de mantenimiento.

Análisis del diagrama de dispersión logarítmica: Este diagrama ayuda a identificar patrones en la ocurrencia de fallas y el tiempo necesario para repararlas. Esto permite priorizar los recursos hacia equipos más críticos o con mayores interrupciones en su operación.

Indicadores clave:

- Frecuencia de fallas: Número de fallas en un período de tiempo determinado.
- MTTR: Promedio del tiempo necesario para reparar los equipos después de una falla.
- Límites de referencia: Se determina como el promedio de la frecuencia de fallas y del MTTR de los equipos analizados, lo que sirve para clasificar el desempeño de cada activo.

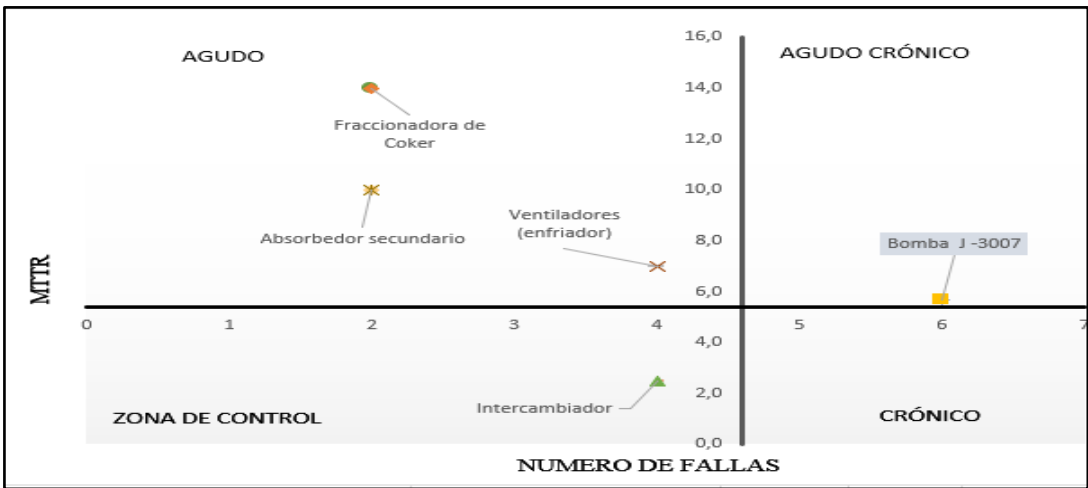
Clasificación de cuadrantes:

- Agudo-crónico: Fallas con alta frecuencia y largos tiempos de reparación. Son las más críticas.
- Agudo: Fallas menos frecuentes, pero con tiempos de reparación prolongados.
- Crónico: Fallas frecuentes, aunque con reparaciones rápidas.
- Zona controlada: Fallas bajo control con baja frecuencia y tiempo de reparación.

Ejemplo de aplicación: Supongamos que se evalúen dos bombas en un proceso industrial. Si una de ellas tiene una alta frecuencia de fallas y un tiempo de reparación prolongado, se clasifica como crítica. En contraste, si otra bomba tiene pocas fallas y reparaciones rápidas, se considera bajo control. Esto guía la asignación de recursos hacia la bomba crítica para minimizar los riesgos operativos.

El uso de esta metodología es ampliamente reconocido en la gestión de mantenimiento y confiabilidad. Fuentes como Predictiva21 destacan que herramientas como esta ayudan a mejorar la toma de decisiones ya establecer estrategias de mantenimiento basadas en datos confiables (Tavares, 2020)

Ilustración 1-3. Diagrama de dispersión logarítmica Coker.



Fuente: Elaboración propia basada en datos de planta Coker

Según la ilustración (1) se concluye lo siguiente:

Interpretaciones y Conclusiones:

- **Priorización de la Bomba J-3007:** El análisis del diagrama de dispersión logarítmica indica que la Bomba J-3007 es el activo crítico que requiere atención prioritaria. Su ubicación en el cuadrante agudo-crónico evidencia que las fallas en este equipo generan un alto impacto en la operación, con paradas prolongadas y costos elevados.
- **Importancia del Mantenimiento:** La ubicación de los ventiladores y la fraccionadora de Coker en el cuadrante agudo, aunque menos críticos que la bomba, resalta la necesidad de un programa de mantenimiento preventivo para evitar que se conviertan en equipos críticos.
- **Optimización de la Logística:** El MTTR elevado del absorbedor secundario, ubicado en el cuadrante crónico, sugiere que la logística de reparación de este equipo podría ser un factor determinante en la duración de las paradas de producción.

Relación con el Proyecto de Investigación:

El análisis del diagrama de dispersión logarítmica proporciona información valiosa para el proyecto de investigación de ENAP. Se confirma la necesidad de abordar las fallas recurrentes en el sellado de la Bomba J-3007 como prioridad.

CAPÍTULO 2:

Análisis de los modos de falla

2. CAPÍTULO II: ANALISIS DE MODO, EFECTO Y DE FALLA

2.1. Análisis De Modo, Efecto y De Falla

El FMEA es un instrumento de organización elemental para que los niveles de confianza funcional de los sistemas industriales, sobre todo en etapas críticas, así como los descritos en la Refinería Aconcagua de ENAP. Este método permite identificar, evaluar y priorizar los modos de falla potenciales de los equipos críticos, en este caso, las bombas y sellos mecánicos del subsistema de absorbente de gases de hidrocarburos.

La finalidad de esta herramienta consiste en disminuir las amenazas operativas de estas máquinas mediante la identificación de los errores potenciales y las afectaciones que producirían en la planta. Esto da lugar a anticiparse a los errores. Estos hallazgos se consideran significativos para establecer planes de corrección y formas de conservación de estos. Por otro lado, el FMEA fortalece la metodología del RCM, debido a que ahonda en los peligros particulares vinculados con cada elemento, lo que permite jerarquizar los elementos y las ejecuciones en relación con la falla generada.

- Altamente crítico: supone parar inmediatamente y amenazas de seguridad, lo cual requiere su abordaje rápido.
- Crítico moderado: errores que malogran el desempeño; sin embargo, no suponen un retraso completo.
- Baja criticidad: fallas de menor importancia que pueden programarse para su resarcimiento en mantenimiento regular.

Resultados esperados

- Identificación de fallas críticas: Con base en el FMEA, se busca identificar los inconvenientes frecuentes y con un alcance mayor, como fugas en los sellos mecánicos o vibraciones en las bombas.
- Estrategias personalizadas: determinar actividades particulares, como mejorar la calidad del sellado, incremento de la regularidad de intervención o actualización tecnológica de componentes.
- Optimización de recursos: Al priorizar fallas críticas, se maximiza la eficiencia del mantenimiento, reduciendo paradas no planificadas y costos operativos.

El FMEA es un aparato metodológico mediante el cual se estimula la eficiencia funcional y el mantenimiento de los equipos, así como la integridad de los trabajadores y el ecosistema, por lo que su aplicación en la empresa en cuestión es fundamental para minimizar problemas y costes.

2.2. Descripción Del Equipo

La bomba centrífuga de la marca Ercone Marelli, modelo KSMK tamaño 2x4x13, funciona todos los días y en todo momento, por lo que se considera un elemento esencial de los procesos. Esta funciona con diésel para acoger los gases de hidrocarburo, lo que facilita el efecto “Sponge oil” (Sundyne, 2023). Según la información técnica del equipo, cada bomba puede entregar un flujo de 850 m³/día y operar a una presión de 20 kg/cm², con un diámetro de impulsor de 340 mm, girando a 2950 RPM mediante un motor de 90 KW y 380 V.

Además, la bomba cuenta con un equipo de reserva (Equipo B) listo para operar en caso de falla del Equipo A. La carcasa está montada en la línea central, lo que permite una expansión térmica mínima que afecta la alineación del conjunto bomba-motor (Sundyne, 2023)

Ilustración 2-1 Bomba multietapa modelo KSMK



Fuente: Fotografía tomada con cámara intrínsecamente, planta Coker ENAP

La bomba Marelli KSMK (BB2) está diseñada específicamente para operar en condiciones extremas de alta temperatura, lo que la hace ideal para aplicaciones industriales críticas. Alta temperatura en este contexto se refiere a rangos de operación entre 200°C y 400°C o más, que son comunes en procesos de refinación de hidrocarburos, generación de energía y petroquímica. Tales grados de temperatura suponen retos capitales, como la amplitud calurosa de los recursos, el detrimento de elementos por el calor y la demanda de un plan fortalecido para salvaguardar la seguridad y la función excelente de estos equipos.

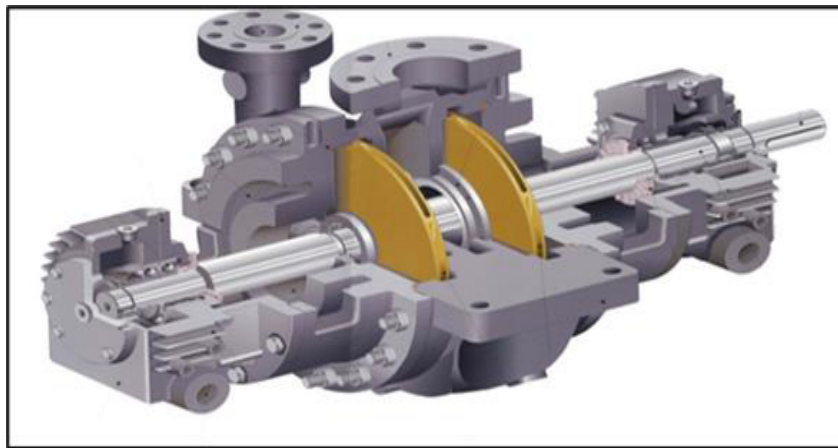
Particularidades esenciales para una temperatura alta:

- **Materiales resilientes:** La bomba emplea recursos especiales como acero inoxidable dúplex y aleaciones duros a la corrosión para salvaguardar su estructura y rendimiento en temperaturas altas.
- **Carcasa Dividida Radialmente:** Esto permite la conservación; asimismo, disminuye las amenazas vinculadas con la malformación térmica, lo que posibilita que los elementos internos se examinen o reemplacen sin problemas.
- **Impulsor de Doble Succión:** optimiza el flujo y disminuye los temblores, al minimizar el desgaste provocado por las presiones de calor.

- Normas API 610/ISO 1370: Estos lineamientos permiten que la bomba acate las normativas internacionales de seguridad, rendimiento y confiabilidad adecuados en funciones de rigor elevado.
- Capacidad de adaptación: Las modificaciones personalizadas y las bridas flexibles posibilitan la bomba cuaje con distintos diseños de sistemas, indispensable para acoplarse a las demandas particulares de cada planta.

Importancia de la Confiabilidad en Alta Temperatura: Las bombas como la Marelli KSMK (BB2) se valoran por la capacidad de confianza y sostenibilidad que tienen. Estas trabajan constantemente en espacios extremos, lo que reduce los estorbos que podrían ser caros y que pueden comprometer la integridad humana. Esto las convierte en una elección preferida para ingenieros que buscan equipos robustos para aplicaciones críticas.

Ilustración 2-2 Bomba en corte



Fuente: (Sundyne, 2024)

Materiales de construcción:

Carcasa de Presión

- Acero Fundido, A216
- 12% de Cromo
- Acero Inoxidable 316
- Dúplex, un tipo de acero inoxidable

Rodete

- Hierro Fundido.
- Acero al Carbono
- 12% de Cromo
- Inoxidable 316
- Dúplex, un tipo de acero inoxidable

Anillos de Desgaste

- Hierro Fundido
- 12% de Cromo endurecido

- 316 AUS con recubrimiento resistente
- Dúplex con recubrimiento resistente)

Eje

- Carbón Steel (Acero al Carbono)
- AISI 4140 (Acero AISI 4140)
- 316 AUS (Acero Inoxidable 316)
- 12% CHR (12% de Cromo)
- Duplex (Duplex, un tipo de acero inoxidable)

Motor eléctrico: Cuenta con un motor marca WEG que es utilizado generalmente para este tipo de bombas, opera a 3000 RPM, Este motor cuenta con 1900 kW de potencia, su frecuencia de red es de 50 Hz (frecuencia de la línea en Chile) y 4 polos, la alimentación es de 4000 voltios.

Caja porta rodamientos: Cuenta con 2 cajas porta rodamientos, una que se encuentra en el lado libre de la bomba y tiene un rodamiento axial de marca SKF 7310 (Sundyne, 2023). Estos rodamientos de una hilera de bolas de contacto angular pueden admitir cargas radiales y axiales que actúan simultáneamente, cuando la carga axial actúa en un solo sentido. Pueden funcionar a altas velocidades y, según la versión, incluso a velocidades muy altas. Son más adecuados que los rodamientos rígidos de bolas para admitir grandes fuerzas axiales que actúan en un sentido.

Capacidad de alta velocidad: Soportan cargas radiales relativamente altas y grandes cargas axiales unilaterales. Por otra parte, en el lado accionamiento de la bomba cuenta con la otra caja porta rodamientos y tiene un rodamiento SKF UN 311. Los rodamientos de una hilera de rodillos cilíndricos están diseñados para admitir cargas radiales altas en combinación con velocidades altas. Al tener dos pestañas integrales en el aro exterior y no tener pestañas en el aro interior, los rodamientos de diseño NU pueden admitir desplazamientos axiales en ambos sentidos. Una característica importante es el diseño desmontable, que facilita el montaje y permite intercambiar los componentes del rodamiento.

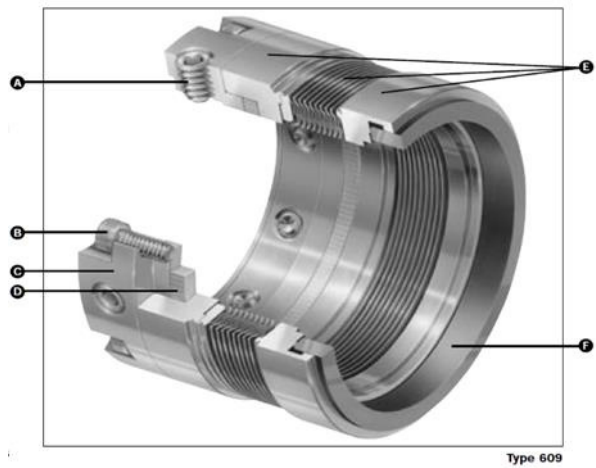
- Alta capacidad de carga radial
- Baja fricción
- Larga vida útil
- Admiten desplazamiento axial en ambos sentidos
- Diseño desmontable

2.3. Descripción Del Sello Mecánico

A continuación, se presenta este tipo de sello mecánico que es el John Crane 609, en el cual se mencionará su tipo de construcción, algunas medidas que posee y las importancias de los planes que cumple las cuales son el API 21 y API 52, ambas son aplicadas especialmente a estos tipos sellos en el contexto el cual opera.

- Los estándares API 21 y API 52 son esenciales para garantizar el rendimiento y la confiabilidad de los sellos mecánicos en entornos industriales críticos.
- API 21 regula la lubricación de los sellos mecánicos, asegurando su funcionamiento eficiente bajo condiciones extremas de temperatura y presión. Esto prolonga la vida útil del sello y previene el desgaste prematuro.
- API 52 establece lineamientos para sistemas de barrera de baja presión, que protegen el sello principal contra contaminación y fugas, cruciales en aplicaciones con fluidos abrasivos o contaminantes.

Ilustración 2-3 Sello mecánico John Crane 609



Fuente: Catalogo de sellos mecánico John Crane

- A: Tornillos de fijación.
- B: Tapa de tornillo cabeza hueca.
- C: Anillo de compresión.
- D: Grafito flexible.
- E: Conjunto de fuelle.
- F: Anillo primario

Ilustración 2-4 Datos dimensionales de sello 609

Typical 609 Dimensional Data								
Seal Dash Number (size code)	Inch			mm			A	C
	A	B	C	A	B	C		
	+ .000 - .002	Ref.	Ref.	+ .000 - 0.05	Ref.	Ref.		
-16	1.000	1.625	1.531	25.40	41.28	38.89		
-18	1.125	1.750	1.562	28.58	44.45	39.67		
-20	1.250	1.875	1.593	31.75	47.63	40.46		
-22	1.375	2.000	1.593	34.93	50.80	40.46		
-24	1.500	2.125	1.593	38.10	53.98	40.46		
-26	1.625	2.250	1.593	41.28	57.15	40.46		
-28	1.750	2.375	1.625	44.45	60.33	41.28		
-30	1.875	2.500	1.625	47.63	63.50	41.28		
-32	2.000	2.625	1.656	50.80	66.68	42.06		
-34	2.125	2.750	1.656	53.98	69.85	42.06		
-36	2.250	2.875	1.719	57.15	73.03	43.66		
-38	2.375	3.000	1.719	60.33	76.20	43.66		
-40	2.500	3.250	1.750	63.50	82.55	44.45		
-42	2.625	3.375	1.781	66.68	85.73	45.24		
-44	2.750	3.500	1.781	69.85	88.90	45.24		
-46	2.875	3.687	1.875	73.03	93.65	47.63		
-48	3.000	3.812	1.875	76.20	96.82	47.63		
-50	3.125	4.000	1.875	79.38	101.60	47.63		
-52	3.250	4.125	1.875	82.55	104.78	47.63		
-54	3.375	4.250	1.875	85.73	107.95	47.63		
-56	3.500	4.375	1.875	88.90	111.13	47.63		
-58	3.625	4.500	1.875	92.08	114.30	47.63		
-60	3.750	4.625	1.875	95.25	117.48	47.63		
-62	3.875	4.750	1.875	98.43	120.65	47.63		
-64	4.000	4.875	1.875	101.60	123.83	47.63		

Fuente: Catalogo de sellos mecánico John Crane

Diseño: Este sello cuenta con fuelles metálicos soldados en sus bordes, también se contiene en su interior otro sello de contención secundaria lo cual se puede decir que existe un sello primario como uno secundario en su interior, pero ambos tienen un propósito ya que el de contención (sello secundario) cumple la función de seguridad.

La norma API 682 tiene como objetivo ayudar a la selección del sello mecánico basándose en la experiencia de ingenieros que trabajan en esta labor, el alcance de esta norma es precisamente para el área de petróleo.

Tolerancias:

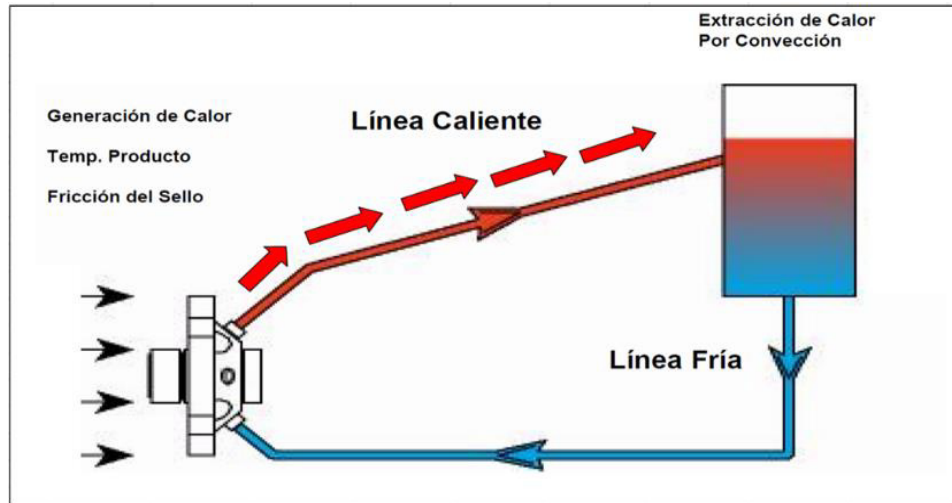
- Temperatura: -75°C a +425°C / -100°F a +800°F (con empaquetadura estática de grafito flexible).
- Presión: Vacío a 25 bar / 360 psi. Vacío a 69 bar / 1,000 psi (con fuelle de doble capa).
- Velocidad: hasta 25 m/s / 5,000 rpm para los tipos 606 y 609.

2.4. Planos De Aplicación API

Los planos API, como el API 52 y el API 21, son protocolos establecidos por la American Petroleum Institute (API) que buscan asegurar el buen desempeño y la durabilidad de los equipos de sellado mecánico en sistemas industriales, especialmente en bombas y compresores.

Plan API 52: El plan API 52 emplea un almacén y fluido que amortigua entre los sellos externos e interiores; igualmente, su tránsito es forzado mediante un anillo de bombo.

Ilustración 2-5 Principio termosifón.



Fuente: Catalogo de sellos mecánico John Crane

El equipo de sellos mecánicos se emplea en bombas verticales y horizontales con el fin de maniobrar líquidos que comprometen la salud de las personas, lo que incluye los que cristalizan, pulverizan cuando hacen contacto con la atmósfera, o explotan o son inflamables. Por consiguiente, posterior a su instalación, se debe verificar estos equipos con el objeto de salvaguardar su seguridad y desempeño:

Manómetro adecuado: tiene que elegirse para el nivel de tensión esperada, al asegurar revisiones exactas y evitar exceso de cargas.

Calibración del interruptor de presión: tiene que ejecutarse entre 10 y 20 psi para conservar la presión dominada en sistemas no presurizados.

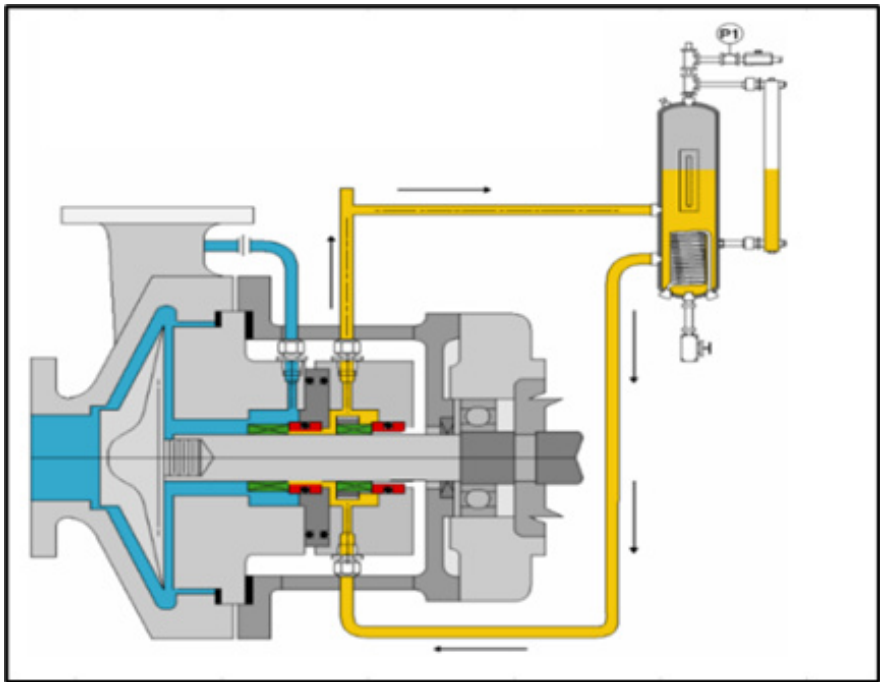
Ventilación y placa orificio: La válvula de venteo tiene que conservarse abierta y colocarse una placa orificio con el objeto de controlar el flujo y conservar la permanencia.

Circulación adecuada del líquido: El fluido debe circular de forma correcta al interior del sello, lo que garantiza un traspaso térmico adecuado.

Fluido amortiguador: Este fluido, al operar a una baja tensión, reduce el frote entre los componentes del sello, lo que merma el deterioro y prolonga la vida útil de la máquina.

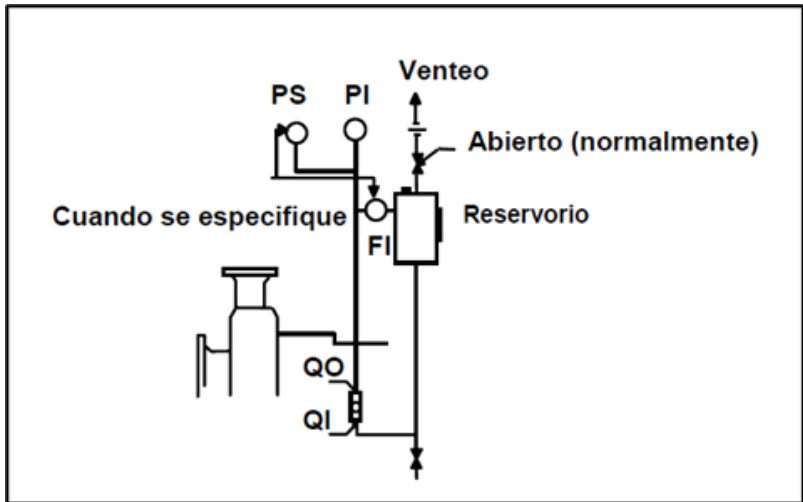
Estas comprobaciones se estiman elementales para impedir salidas, errores prematuros e inconvenientes de sobrecalentamiento; de esta manera, se garantiza una operatividad constante y confiable del sistema.

Ilustración 2-6 Plan API 52



Fuente: Catalogo de sellos mecánico John Crane

Ilustración 2-7 Plan API 52



Fuente: Catalogo de sellos mecánico John Crane

El Plan API 21 se diseñó para brindar una capacidad de fluidos desde la salida de la bomba hacia el espacio del sello mecánico, lo que asegura su funcionamiento lubricado, la sanidad del sello y el enfriamiento. Para ello, emplea elementos esenciales: un filtro, placa orificio y un intercambiador de calor, con el fin de dominar la fluidez y conservar los elementos óptimos de operatividad.

Características principales del Plan API 21:

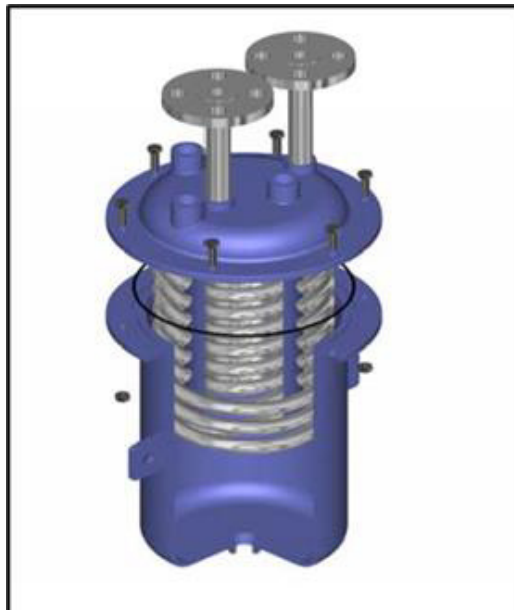
- Control de temperatura y flujo: el engranaje de temperatura del material no tiene que superar los 150°C, con el objeto de impedir deterioros por golpe térmico.
- Intercambiador de calor: cumple un rol especial para disipar el calor del fluido. Empero, podría malgastar efectividad a causa del acaparamiento de depósitos o ventas, toda vez que el agua alberga residuos o minerales.

- Riesgos de bloqueo: En aplicaciones que manejan fluidos viscosos, termo sensitivos o lodos, es común que las tuberías o los orificios de las conexiones se bloqueen, afectando el flujo y la eficiencia del sistema.
- Aplicaciones típicas: Este plan se utiliza principalmente en bombas horizontales diseñadas para manejar líquidos limpios a altas temperaturas con partículas ocasionales.

Pasos para la verificación tras la instalación

- Instalación de la placa orificio: verificar que se instaló una placa con una perforación de al menos 1/8 [In]. Este elemento controla la fluidez hacia el espacio de sellado, lo que evita el exceso de presión o caudales no controlados.
- Limpieza del filtro: asegurase de que el filtro no tenga sucios que puedan obstaculizar el sistema o deteriorar el intercambiador de calor.
- Estado del intercambiador de calor: certificar que este no se encuentre atascado por depósitos. De esta manera, se posibilita una fluidez permanente y que se disipe el calor eficientemente.
- Temperatura del líquido: Evidenciar que la temperatura del fluido saliente del intercambiador esté al menos 10°C por debajo de la temperatura de vaporización. Este margen se considera elemental para impedir la acumulación de vapor y conservar la fijeza del sistema.

Ilustración 2-8 *Enfriador plan API 21*



Fuente: Catalogo de sellos mecánico John Crane

2.5. Análisis SIPOC

Este es un instrumento capital de organización de ejecuciones, dado que brinda un panorama completo sobre las acciones entre insumos, proveedores, procesos, clientes y productos. En efecto, este posibilita vehiculares procesos complicados, como el subsistema de mantenimiento del sistema de bombeo en la Refinería Aconcagua de ENAP.

Aplicación del modelo SIPOC: este se ocupa en las bombas J-3007 A y J-3007 B, al detectar los factores clave que atesoran su operatividad correcta y segura:

Proveedores: Fabricantes y distribuidores de materiales como sellos mecánicos, válvulas y componentes críticos de las bombas.

- Equipos de mantenimiento que aseguran el soporte técnico.
- Entradas (Inputs): Condiciones del fluido de proceso: hidrocarburos gaseosos.
- Parámetros operativos: presión (20 kilos/cm²) y flujo (850 m³/día).
- Lubricantes y sistemas auxiliares, como barreras de sello.
- Procesos: Absorción y transporte de gases de hidrocarburos.
- Operación continua en condiciones seguras, evitando fugas.
- Salidas (Outputs): Transporte eficiente del gas sin interrupciones.
- Cumplimiento de estándares ambientales y de seguridad.
- Clientes: Sistema de refinación global que depende del flujo continuo.
- Operarios responsables de su manejo.
- Medio ambiente, cuya protección se asegura minimizando riesgos de fugas.
- Importancia de las tareas de mantenimiento

La manutención se enfoca en hacer que perdure la utilidad de los elementos importantes, como los sellos mecánicos, al minimizar los errores operativos que comprometan el rendimiento del sistema. Así, se identificó la falta de capacidad para brindar una fluidez de 850 m³/día o una presión de 20 kilos/cm²; como consecuencia, hay una afectación directa en la eficacia operacional.

Tabla 2.1 Modelo SIPOC

Proveedores	Entradas	Proceso	Salidas	Clientes
Juan grúa	Sellos mecánicos tipo 604	Operación de bombeo: Las bombas J-3007 A y B transfieren hidrocarburos desde el equipo E-3001 hasta el compresor C-3058.	Flujo continuo y presurizado de hidrocarburos	Equipo de operaciones de la refinería
Proveedores de lubricantes	Lubricantes específicos para bombas y sellos mecánicos	Monitoreo y control: Se supervisarán variables como presión, temperatura y vibraciones para asegurar que las bombas operen dentro de los parámetros establecidos.	Información sobre el estado operativo de las bombas y sellos	Equipo de mantenimiento
Fabricantes de repuestos	Repuestos para bombas y componentes críticos	Mantenimiento: Se llevan a cabo tareas de prevención con el fin de salvaguardar la confiabilidad de las bombas, al minimizar trabas no previstas.	Rendimiento optimizado de las bombas y mayor vida útil.	Alta Dirección de ENAP
Empresas de Servicios Técnicos	Servicios técnicos especializados para instalación y reparación.	Optimización del proceso: Se implementan mejoras técnicas basadas en el análisis de fallas para incrementar la eficiencia operativa.	Documentación e informes de rendimiento.	Reguladores ambientales y de seguridad

Fuente: elaboración propia

La Tabla detalla el modelo SIPOC. Para ello, se expone un análisis detallado:

Proveedores: Cada proveedor cumple un rol notable en el sistema de bombeo. John Crane brinda los sellos mecánicos, lo que garantiza que las bombas operen eficientemente y sin escapes. Los proveedores de lubricantes suministran los fluidos necesarios para mantener los sellos y las bombas en buen estado. Los fabricantes de repuestos aseguran que existen piezas de repuesto disponibles para mantenimiento y reparaciones. Las empresas de servicios técnicos ofrecen apoyo especializado para la instalación, reparación y optimización de las bombas.

Entradas: Las entradas son los materiales o recursos necesarios para que el sistema funcione correctamente. Estos incluyen los sellos mecánicos, los lubricantes y los repuestos. Sin estos componentes, el sistema de bombeo no podría operar de manera eficiente ni segura.

Proceso: Los procesos incluyen las actividades realizadas para asegurar el funcionamiento del sistema de bombeo. Esto abarca desde la operación de bombeo para trasladar hidrocarburos, el monitoreo y control constante de variables como presión y temperatura, el mantenimiento de las bombas, y la optimización del proceso mediante la implementación de mejoras basadas en el análisis de fallas.

Salidas: Las salidas son los resultados o productos generados por el sistema de bombeo. Esto incluye el flujo continuo de hidrocarburos, la información operativa sobre las bombas que permite a los equipos de mantenimiento actuar de manera preventiva, el rendimiento optimizado de las bombas y la documentación técnica necesaria para asegurar que las operaciones cumplen con los estándares de seguridad y regulatorios.

Cientes: Los clientes son las partes interesadas que dependen de la correcta operación del sistema de bombeo. Estos incluyen al equipo de operaciones, que se asegura de que el flujo de hidrocarburos no se interrumpa, al equipo de mantenimiento, que mantiene las bombas operativas, a la alta dirección de ENAP, que busca asegurar la eficiencia del sistema, ya los reguladores ambientales. y de seguridad, que necesitan documentación sobre el rendimiento del sistema para garantizar que cumple con las normativas.

2.6. Modos De Fallas

Estos suponen los distintos modos en que una máquina o sistema dejaría de operar completa o parcialmente. Por lo tanto, el primer paso es detectarlos, lo que posibilita analizar los errores y entender los causantes de estas fallas.

Estos modos podrían provenir de los siguientes elementos:

- Fatiga: debilitamiento del material por esfuerzos repetitivos.
- Corrosión: degradación química que afecta la estructura o funcionalidad.
- Desgaste: pérdida gradual de material por fricción o uso prolongado.
- Sobrecarga: esfuerzos que exceden la capacidad del sistema.
- Vibraciones excesivas: que pueden generar daños o desajustes estructurales.

Identificar los modos de falla facilita la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo. Estos recursos estratégicos posibilitan prever inconvenientes, jerarquizar intervenciones de corrección y mermar la temporalidad de falta de operación. En esa medida, entender los modos perfecciona la planta de conservación y asegura la inversión de estas máquinas, fortalece la seguridad y permanencia funcional, lo que destaca la relevancia de una perspectiva proactiva en la administración de activos en la industria.

2.7. FMEA

El criterio de severidad busca cuantificar las afectaciones con base en un rango, los cuales son de salud, ambiental, salud y operatividad.

Tabla 2.2 Rango de severidad

Probabilidad de falla	Criterio: Severidad de efecto	RANGO
Riesgoso Sin Advertencia	Rango de Severidad muy alta, cuando el modo de una falla potencial afecte la operación segura de un vehículo y/o involucre el incumplimiento con algún requerimiento regulatorio/gubernamental, sin advertencia.	8
Riesgoso Con Advertencia	Rango de Severidad muy alta, cuando el modo de una falla potencial afecte la operación segura de un vehículo y/o involucre el incumplimiento con algún requerimiento regulatorio/gubernamental, con advertencia.	7
Muy alto	Vehículo/Producto/Componente no opera (pérdida de funciones primarias).	6
Alto	Vehículo/Producto/Componente opera, pero en un nivel de desempeño reducido. Cliente muy insatisfecho.	5
Moderado	Vehículo/Producto/Componente opera, pero algún(os) producto(s)/componente(s) de Confort/Conveniencia no opera(n). Cliente insatisfecho.	4
Bajo	Inconformidades en algún aspecto de Ajuste, Acabado, Ruido o Rechinado. El defecto es notado por más clientes (más del 75%).	3
Muy bajo	Inconformidades en algún aspecto de Ajuste, Acabado, Ruido o Rechinado. El defecto es notado por un mínimo de clientes (menos del 25%).	2
Ninguno	Sin efecto.	1

Fuente: (Lange, Chrysler, & Leggett, 2001)

La anterior ilustración categoriza los errores de acuerdo con los lineamientos: probabilidad de falla y gravedad del efecto. Esto facilita la priorización de las intervenciones según la afectación potencial de los problemas, lo cual es capital para ejecutar acciones idóneas. En este punto, se describe cada categoría:

Riesgoso sin advertencia (Rango 8): significa los errores que son muy altos y que, por ende, podrían dañar gravemente la funcionalidad de la máquina o el sistema sin avisar.

Riesgoso con advertencia (Rango 7): semejante a la situación previa, pero con la distinción de que ahora hay un aviso antes de que se lleve a cabo el inconveniente. Aunque la severidad sigue siendo alta, la advertencia permite alguna acción correctiva antes de que la falla se materialice, lo que reduce parcialmente el riesgo.

Muy Alto (Rango 6): En esta categoría, la falla resulta en la pérdida completa de la función principal del producto o sistema (por ejemplo, un vehículo que no opera), lo que tiene un impacto crítico en la operación.

Alto (Rango 5): El producto o sistema sigue funcionando, pero a un nivel inferior al esperado, lo que provoca insatisfacción en los usuarios o clientes debido a un rendimiento reducido.

Moderado (Rango 4): La falla afecta componentes no esenciales del producto (como características de confort o conveniencia), lo que también genera insatisfacción, pero no interrumpe el funcionamiento básico del sistema.

Bajo (Rango 3): Aquí, la falla está relacionada con defectos menores como ruidos o acabados imperfectos que son notados por más del 75% de los clientes. Aunque estos defectos son visibles, no afectan el funcionamiento principal del equipo.

Muy Bajo (Rango 2): Similar al caso anterior, pero con defectos menos notorios (menos del 25% de los clientes los notan). Estos defectos no afectan el rendimiento, aunque podrían influir en la percepción del cliente.

Ninguno (Rango 1): No hay falla en el sistema, lo que significa que no existe impacto negativo en la operación o la experiencia del cliente.

Esta tabla es pertinente para jerarquizar las amenazas y proponer alternativas para abordar las fallas que suponen mayores afectaciones en todos los ámbitos. Esto se cimenta una administración de peligros en la cual la intensidad y posibilidad de errores facilita la categorización y las acciones consientes para contrarrestar la continuidad de daños.

Tabla 2.3 Rango de ocurrencia

Probabilidad de accidente	Porcentaje de averías	RANGO
Muy Arriba: El incidente es casi inevitable	1 en 2 ³	8
	1 en 3	8
Alto: Incidentes repetitivos	1 en 8	7
Moderado: Incidentes ocasionales	1 en 20	6
	1 en 80	5
	1 en 400	4
	1 en 2000	3
Bajo: Relativamente pocos incidentes	1 en 15.000	2
Muy baja: La falla está asociada a fallas aisladas en otros procesos	1 en 150.000	1
	1 en 1.500.000	1

Fuente: (Lange, Chrysle, & Leggett, 2001)

La detección alude al nivel de respuesta para detectar errores previos al convertirse en daños colaterales que malogren el rendimiento de una máquina o sistema. Para ello, es importante

vigilar y examinar los señaladores clave, para llevar a cabo acciones correctivas; en esto radica su pertinencia.

Tabla 2.4.Rango de detención

Probabilidad de Accidente	Criterio: Detección	RANGO
Incertidumbre Absoluta	El control del diseño no detecta una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente; o no hay control del diseño.	8
Muy Alejado	La probabilidad muy alejada de que el control del diseño detecte una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente.	7
Alejado	La probabilidad alejada de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente.	6
Bajo	La probabilidad muy baja de que el control del diseño detectará un potencial causa del incidente o del modo de fallo subsecuente.	5
Moderado	La probabilidad baja de que el control del diseño detectará un potencial causa del incidente o del modo de fallo subsecuente.	4
Moderadamente Alto	La probabilidad moderada de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente.	3
Alto	La probabilidad muy alta de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente.	2
Casi Seguro	El control del diseño detectará casi ciertamente una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente.	1

Fuente: (Lange, Chryste, & Leggett, 2001)

La tabla de frecuencia se consigna el tiempo para ejecutar estos modos estratégicos seleccionados. Se le designó un grado: 1 es el nivel más bajo y 9 el máximo.

Tabla 2.5 Rango de detención

Frecuencia	
RANGO	Tiempo
1	al día
2	cada 5 días
3	1 semana
4	1 mes
5	2 meses
6	6 meses
7	8 meses
8	1 año
9	2 años
10	5 años o mas

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 2.6. FMECA

Descripción de la unidad análisis				Descripción de falla			Análisis criticidad				Detalle detención	
Equipo	Función	#	Falla funcional	#	Modo de falla	Causa de falla	S	O	D	NPR	Estrategia	Frecuencia
Bomba sundyne Marelli KSMK	Entregar un flujo de 850 [m3/día] y una presión de 20 [kilos/cm2]	1	Genera flujo menor a 850 [m3/día] y una presión de 20 [kilos/cm2]	1.1	Línea de succión obstruida	Caudal bajo	8	2	5	80	Aplicar mantenimiento predictivo	4
						Impulsor dañado	7	2	5	70		
						Filtro de succión obstruido	5	6	2	60		
				1.2	Bomba desalineada	Desalineamiento motor-bomba	4	2	5	40	Aplicar mantenimiento predictivo	4
						Problema en base de bomba	4	4	3	48	Revisiones periódicas	3
						Problema en machón de acoplamiento	6	2	5	60		
				1.3	Temperaturas altas en caja de rodamientos	Lubricación deficiente	4	6	3	72	Aplicar mantenimiento preventivo	4
						Daño en rodamientos por sobrecarga	5	5	4	100		
				1.4	Acoplamiento dentado del eje deformado	Daño en acoplamiento por deformación	4	5	4	80		
		2	No entregar un flujo de 850 [m3/día] y una presión de 20 [kilos/cm2]	2.1	Filtración en sello mecánico	Mala instalación	7	4	7	196	Revisiones periódicas	3
						O ring dañado	5	4	8	160		
				2.2	Rodamiento dañado	Falta de grasa	4	3	3	36	Revisiones periódicas	3
						Grasa contaminada	6	4	5	120	Aplicar mantenimiento preventivo	5
						Picadura en rodamientos	8	2	7	112		
				2.3	Motor eléctrico con sobrecarga	Flujo de corriente excesivo	5	3	6	90	Aplicar mantenimiento preventivo	3
						Sobrecarga forzada del motor	5	5	5	125		4
				2.4	Álabes de bomba dañados	Cambios repentinos de presión	7	3	4	84	Aplicar mantenimiento preventivo	4
				2.5	Rotura de ducto	Filtración en línea de succión de la bomba	4	4	5	80	Aplicar mantenimiento preventivo	4

Fuente: Elaboración propia.

El examen consciente de los modos de falla en la bomba Sundyne Marelli KSMK (BB2) posibilita detectar zonas elementales que suponen intervención rápida para que todo se encuentre en orden y así reducir los peligros más graves. Esto se cimenta en la calculación del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) por medio los lineamientos de severidad (S), ocurrencia (O) y detectabilidad (D), lo que conduce a una jerarquización eficaz de las acciones correctivas.

Principales modos de falla y recomendaciones: Filtración en el sello mecánico (NPR = 196): Causa: Instalación incorrecta y junta tórica dañada. Este modo de falla supone un peligro inminente a raíz de su severidad (S=7), alta frecuencia de ocurrencia (O=4) y baja detectabilidad (D=7). Las consecuencias incluyen paradas no planificadas y fugas de hidrocarburos con posibles impactos ambientales. Implementar inspecciones periódicas y capacitaciones para garantizar una instalación correcta de los sellos mecánicos y monitorear su estado de manera preventiva.

Daño en los rodamientos (NPR = 120): Grasa contaminada y picaduras en los rodamientos. Genera vibraciones excesivas y disminución en la eficiencia operativa, con potencial de llevar a una falla catastrófica. Realizar mantenimiento preventivo frecuente, monitoreo de vibraciones y control riguroso de la calidad de los lubricantes utilizados.

Obstrucción de la línea de succión (NPR = 80) y daño en los álabes de la bomba (NPR = 84): Caudal bajo y cambios bruscos de presión. Reducción en el flujo y la presión requeridas, afectando la eficiencia operativa. Implementar mantenimiento predictivo utilizando técnicas como análisis de flujo y monitoreo de presión para detectar anomalías antes de que afecten el rendimiento.

Desalineamiento de la bomba (NPR = 40) y temperaturas altas en la caja de rodamientos (NPR = 72): Aunque presentan menor criticidad, estos problemas pueden derivar en complicaciones mayores si no se gestionan adecuadamente. Aplique mantenimiento correctivo oportuno y establezca controles regulares para prevenir el deterioro de los componentes.

El enfoque en los modos de falla con mayor NPR permite priorizar recursos y esfuerzos hacia aquellos riesgos que podrían comprometer la seguridad, la continuidad operativa y la sostenibilidad ambiental. La adopción de estrategias como el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo no solo ayuda a mitigar estos riesgos, sino que también contribuye a mejorar la eficiencia y la vida útil de los equipos. Una gestión proactiva basada en datos y análisis de riesgos es esencial para mantener los estándares operativos y garantizar la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

CAPÍTULO 3:

Análisis de falla y evaluación técnica.

3. CAPITULO III: EVALUACIÓN TÉCNICA

3.1. Costos De Mantenimiento

Los gastos de mantenimiento de un sello mecánico equivalen a distintos aspectos: cantidad de vida de los materiales, gastos de operación por año, costo actualizado de la pieza, entre otros. Ahora bien, estas acciones correctivas se clasifican en 3 modos de arreglos: básica, intermedia e integral, lo que depende también la naturaleza compleja de cada elemento y los gastos asociados.

Reparación básica: esto se ejecuta toda vez que el sello no presenta problemas de mantenimiento. Esto ejecuta limpiezas, valoración y reemplazo de piezas básicas. Adicionalmente, se lleva a cabo un test y una instalación según los lineamientos API 682. Este nivel no requiere gastos económicos costosos.

Reparación intermedia: aquí, el sello tiene un deterioro más evidente; sin embargo, todavía es operativo. En este punto, se desarma completamente el equipo, se limpia y valora de forma pormenorizada; se realiza la sustitución de los elementos más complicados, como la camisa, el cuello, entre otros. Igualmente, se lleva a cabo lapeado de insertos y se comprueba el rendimiento por medio de la prueba API 682. Este tipo de corrección presenta un coste moderado a raíz de su intervención detallada y las piezas sustituidas.

Reparación integral: toda vez que el sello tiene imperfecciones de fachada y funcionales, su arreglo demanda una rigurosidad mucho mayor. Por encima de las labores señaladas, se tiene en cuenta la actualización total del combustible metálico u otros. Esto demanda un componente económico más significativo; sin embargo, se obtiene una mejor funcionabilidad y permanencia a futuro.

Con relación a los gastos de mantenimiento, se debe estimar las afectaciones externas: uso de energía, perjuicios de productividad y amenazas del medioambiente. Sin intervención oportuna, se generan paros de labores y gastos mayores de inversión económica. Esto destaca la aplicación de una manutención preventiva eficiente.

Tabla 3.1 Costos de mantenimientos y valor sello nuevo

Actividad	Costo (CLP)	Tiempo Promedio	Destrucción del negocio	Costo global (estimado)
Sello nuevo	\$23.065.627	1-2 semanas	Alta (parada total del sistema)	\$23.065.627
Reparación básica	\$8.237.724	3-5 días	Moderada (baja eficiencia operativa)	\$8.237.724
Reparación intermedia	\$12.356.586	1 semana	Moderada (baja eficiencia operativa)	\$12.356.586
Reparación Integral	\$16.475.448	1-2 semanas	Alta (parada parcial o no completa)	\$16.475.448

Fuente: sellos mecánico John Crane

- Sello nuevo: La adquisición de un sello nuevo tiene un costo de \$23.065.627 CLP y requiere entre 1 y 2 semanas para su instalación. Esta opción implica una parada total del sistema, lo que significa una alta destrucción del negocio debido a la inactividad.
- Reparación básica: Esta opción tiene un costo de moderado, ya que la eficiencia operativa se ve reducida, pero no se detiene completamente el proceso.
- Reparación intermedia: Con un costo de \$12.356.5baja eficiencia operativa similar
- Reparación integral: Este tipo de reparación, que cuesta \$16.475.448 CLP y toma entre 1parada parcial del sistema, Cada tipo de intervención tiene costos y tiempos distintos, y los efectos sobre la operación pueden variar desde un nivel de disminución de la eficiencia hasta una detección.

3.2. RCA

La causa raíz busca identificar la causa principal de una falla o problema en un sistema o proceso. En este caso de un sello mecánico, la causa raíz puede ser el diseño y selección inadecuado del sello.

También pueden ser causas de fallos en los sellos mecánicos el exceso de presión, el trabajo en seco, el ataque químico, la temperatura excesiva, los problemas de montaje, entre otros

En el 80% de los casos, los sellos fallan antes de cumplir con su ciclo de vida debido a estas causas.

Teniendo en consideración que las fallas frecuentes de la bomba y las que se han estudiado hasta ahora son las siguientes:

- No entrega fluido
- Entrega menos liquido del esperado.
- No levanta presión.
- Consume excesivo de energía
- Presenta excesivo ruido.
- Presenta excesiva vibración.
- Presenta alta temperatura alta en la zona de cojinetes y sellos.
- Presenta excesiva fuga por empaques o sellos mecánico

Lo que tiene como objetivo el RCA buscar soluciones de este problema para la bomba de estudio.

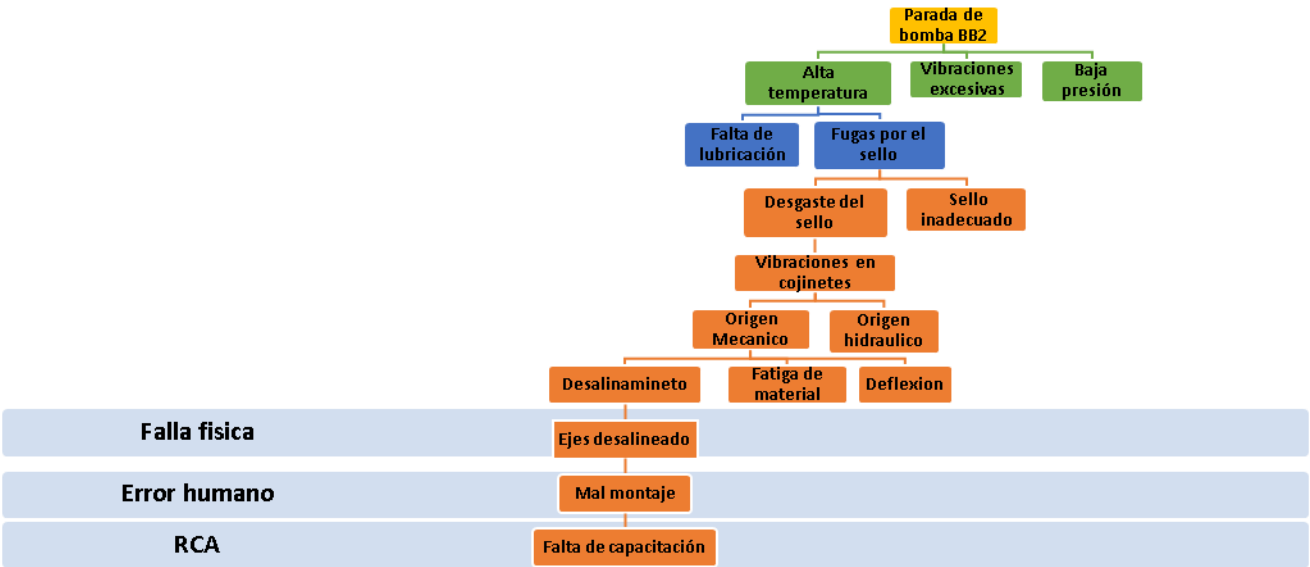
- El primer paso para definir la causa raíz el cuál es el evento o la falla en este caso es la detención bomba BB2 esta detención es producida por la falla que se menciona anteriormente.
- El segundo paso es la recopilación de información teniendo ya un historial de fallas de la bomba y los precios de mantenimiento del sello mecánico como también se puede indagar los costos por perdidas de producción ya que al tener el sistema de sponge oil y si presenta dificultades es un gran impacto para la empresa.

- Por lo que se debe tener en cuenta que técnicas de mantenimiento se usan y cuales mejoras se pueden implementar.
- El tercer paso es la creación de un árbol lógico con intención de representar evento y sub-eventos lógicos no deseados, el cual da respuesta a los modos de fallos ya expuestos en el plan de mantenimiento.
- El último paso es crear un plan de acción que tiene como objetivo eliminar las causa raíz y obviamente plantear mejorar de mantenimiento.

3.2.1. Hipótesis 1

Se plantea un estudio de causa raíz en el cual se elaboran hipótesis de estas fallas las cuales se presentaron en su operación, y se inicia con un evento luego los hechos, las fallas físicas, humana y la causa raíz.

Ilustración 3-1 Diagrama Hipótesis 1



La imagen muestra un diagrama de causa y efecto (también conocido como diagrama de Ishikawa o espina de pescado) relacionado con la parada de la bomba BB2, una situación de fallo en el sistema. A continuación, se explica cada uno de los elementos del diagrama:

Causa principal:

- Parada de la bomba BB2: La parada de la bomba es el evento central que se quiere analizar, y tiene tres causas principales relacionadas:
- Alta temperatura: Indica que la bomba podría estar operando a temperaturas más altas de lo recomendable, lo cual puede dañar los componentes internos.
- Vibraciones excesivas: Las vibraciones anormales en la bomba pueden afectar la estabilidad de los rodamientos y otras partes críticas del equipo.

- Baja presión: Puede generar un funcionamiento deficiente de la bomba y afectar su capacidad de entrega el flujo deseado.

Causas secundarias:

- Falta de lubricación: Esta es una de las principales causas de desgaste en componentes como los sellos y los cojinetes. La falta de un sistema de lubricación adecuado puede provocar el calentamiento y fallos prematuros de estos componentes.
- Fugas por el sello: Los sellos inadecuados o desgastados pueden provocar fugas, afectando la operación de la bomba.
- Desgaste del sello: Un sello que se desgasta puede ser la causa directa de la fuga de fluidos, lo que genera pérdidas en el rendimiento de la bomba.
- Vibraciones en cojinetes: Los cojinetes son una parte clave en el funcionamiento de la bomba. Las vibraciones excesivas pueden dañarlos y hacer que la bomba deje de funcionar correctamente.

Causas más profundas:

- Desalineamiento: Un desalineamiento de los ejes puede generar fricción innecesaria y aumentar el desgaste de las piezas.
- Fatiga de material: A medida que el material se somete a tensiones repetidas, puede experimentar fatiga, lo que eventualmente lleva al fallo de la bomba.
- Deflexión: La deflexión de los componentes, debido a sobrecargas o deformaciones, también puede contribuir a la parada de la bomba.

Errores humanos:

- Mal montaje: Una mala instalación o ensamblaje de la bomba puede ser la causa de fallos tempranos, como fugas, vibraciones o desalineamientos.
- Falta de capacitación: Si los operadores o el personal de mantenimiento no están debidamente capacitados, podrían cometer errores que resulten en un funcionamiento incorrecto de la bomba.

Análisis RCA (Análisis de causa raíz):

- Falta de capacitación: Es importante destacar que la falta de formación técnica y práctica adecuada puede agravar todas las situaciones anteriores, ya que el personal no podrá identificar ni corregir problemas de forma eficiente.
- El diagrama ilustra de manera detallada las posibles causas detrás de la parada de la bomba BB2, organizándolas por niveles de causas directas e indirectas. Esto permite realizar un análisis más preciso y enfocado para la mejora del rendimiento y la prevención de fallos en el sistema.

Para optimizar el desempeño mecánico, es vital priorizar la capacitación continua y el bienestar del personal. Desde 2020, ENAP reporta 17 nuevos ingresos al área de mantenimiento, pero las capacitaciones de 24 horas no han cubierto a todos, lo que genera brechas en

conocimientos y rendimiento. Esto se debe llevar a cabo de forma anula y tener en cuenta los lineamientos requeridos para ejecutar labores idóneas de mantenimiento, lo que requiere implementación tecnológica.

Por tal razón, se recomienda incentivar la formación constante para que los trabajadores tengan conocimientos actualizados sobre sus herrameintas y sistemas de trabajo.

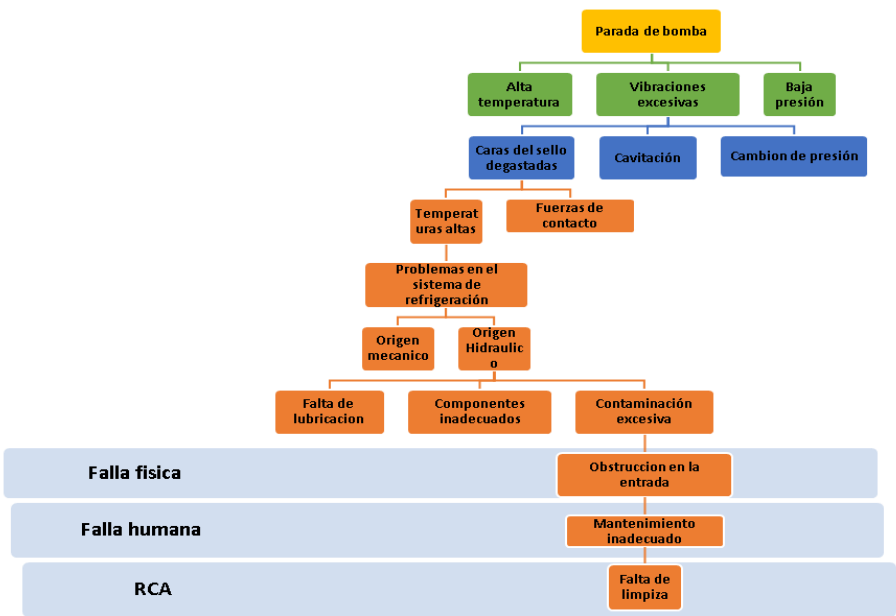
Bienestar y Condiciones Humanas: el estado de salud emocional y física de los trabajadores es capital para la funciones correctas. Por lo tanto, se debe reducir la presión y las cargas laborales a partir de actividades de esparcimiento y relajación.

Asegurarse de que el personal esté en condiciones óptimas no solo mejora el ambiente laboral, sino que también reduce la posibilidad de cometer errores causados por distracciones o falta de concentración. Cuando el bienestar físico y emocional de los empleados es priorizado, se fomenta un equipo más motivado y con mayor capacidad de resolver problemas de manera eficiente.

Al mejorar la logística para facilitar el acceso a servicios de reparación junto con la implementación de programas de capacitación continua y el cuidado del bienestar humano del personal, se puede crear un entorno de trabajo más eficiente y efectivo. Estas no solo incrementan la productividad y la satisfacción del cliente, sino que también promueven un equipo más saludable y comprometido, lo que resulta en un rendimiento óptimo del sector de medidas de trabajos mecánicos.

3.2.2. Hipótesis 2

Ilustración 3-2 Diagrama hipótesis



Las vibraciones excesivas observadas en sistemas de refrigeración pueden ser causadas por fenómenos como la cavitación, el desgaste del sello mecánico y variaciones de presión en el fluido transportado. Los fallos en mantenimiento y uso de refrigerantes obstruyen el intercambiador de calor, clave según la norma API 21. Para ello, se recomienda ejecutar limpiezas cada cierto tiempo

del sistema de refrigeración del sello y el filtro, en función de los lineamientos determinados en la norma API, con el fin de mermar inconvenientes y optimizar la confiabilidad del sistema.

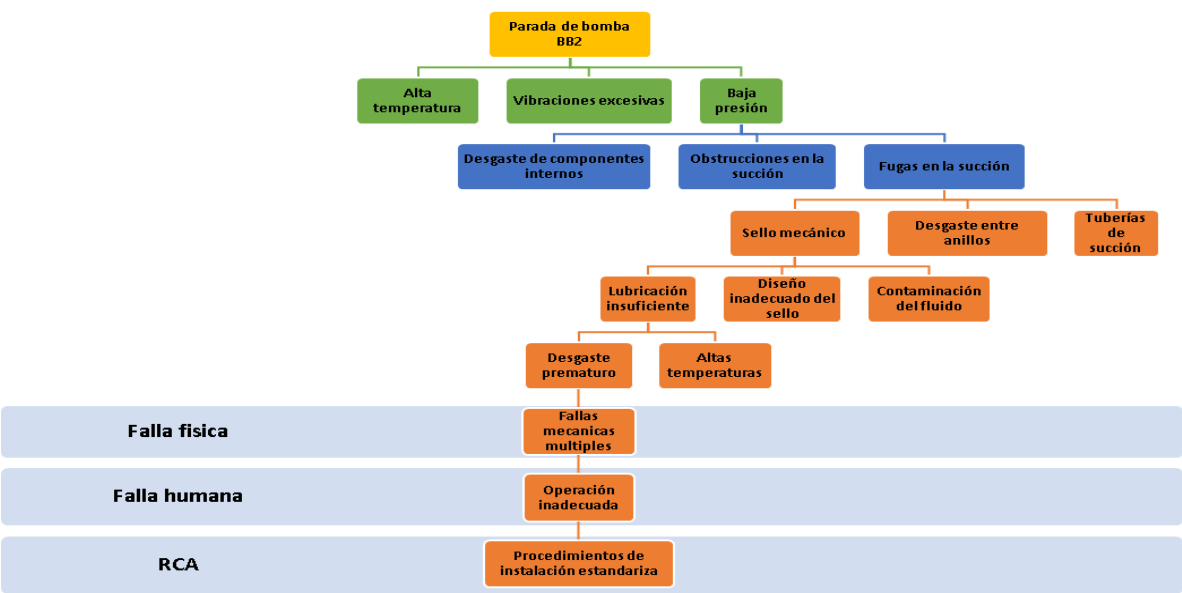
La hipótesis sugiere que los temblores en sistemas de refrigeración, producidas por cavitación y deterioro del sello mecánico, malogran el intercambiador de calor, clave según la norma API 21. Los residuos y mal mantenimiento, como el uso indebido de refrigerantes, obstruyen el enfriador, lo que merma la funcionalidad y provoca errores. La hipótesis supone limpiezas constantes de conformidad con la norma API, con el fin de impedir estas problemáticas y optimizar el rendimiento.

Además, las impurezas en el fluido y prácticas de mantenimiento inadecuadas, como el uso incorrecto de refrigerantes, pueden resultar en obstrucciones en el enfriador. Esto puede causar una reducción en la eficiencia del intercambio de calor y potenciales fallos en el sistema. La hipótesis sugiere que implementar limpiezas regulares del sistema de refrigeración del sello y el filtro, siguiendo las directrices específicas de la norma API, podría prevenir estos problemas y asegurar un rendimiento óptimo del sistema de refrigeración.

Establecer frecuencia semanal o llamada ruta de inspección por oportunidad en los componentes ayudaran a mantener en buen estado y evitar fallas imprevistas por limpieza.

3.2.3. Hipótesis 3

Ilustración 3-3 Diagrama hipótesis 3



La optimización de la logística en campos de la industria resulta capital para optimizar la capacidad operacional. Implementar un taller móvil o servicio *in situ* se considera una alternativa útil, dado que posibilita mermar la temporalidad de no operación y los gastos logísticos vinculados con el traslado de máquinas pesadas a sitios de reparación centrales.

Un taller móvil con todos los recursos permite que los arreglos se hagan con los lineamientos técnicos pertinentes. Asimismo, contar con un inventario apropiado de piezas para reemplazar e instrumentos para reparar supone una mejor utilización del tiempo productivo y satisface al usuario que requiere los servicios. Sin embargo, también existen desafíos, como la realización de reparaciones en espacios reducidos o condiciones extremas, lo que puede incrementar el riesgo de instalaciones incorrectas que afectan la funcionalidad del equipo y la producción (Tabares, 2012).

Se detalla en resumen procedimiento de instalación de John Crane.

- Preparación: Verificar que todos los componentes del sello mecánico estén presentes y en buen estado. Inspeccionar las superficies de montaje para asegurar que estén limpias, planas y libres de contaminantes.
- Despiche: Antes de la instalación, realizar el despiche del sello mecánico. este implica asegurar que no haya presión sobre las caras de sellado para evitar daños durante la instalación.
- Montaje del sello: Colocar el sello mecánico en su posición designada, asegurando que esté alineado correctamente con el eje de rotación. Utilizar las herramientas adecuadas y el procedimiento especificado por el fabricante para montar el sello mecánico de manera segura y precisa.
- Ajuste y tensado: Ajustar los elementos de sujeción según las especificaciones del fabricante. Esto puede incluir el uso de tornillos de ajuste para controlar la presión del sello mecánico.

Pruebas preliminares: Antes de poner en funcionamiento la bomba o el equipo, realizar múltiples pruebas de verificación:

- Verificar la rotación libre del eje.
- Inspeccionar visualmente el sello mecánico para detectar fugas.
- Realizar pruebas de presión y temperatura según lo recomendado por el fabricante.
- Puesta en marcha: Una vez completadas las pruebas preliminares con éxito y asegurado que el sello mecánico funciona correctamente, proceder con la puesta en marcha normal del equipo.
- Monitoreo y mantenimiento: Establecer un programa de monitoreo regular para asegurar el rendimiento continuo del sello mecánico. Realizar mantenimientos preventivos según las recomendaciones del fabricante para prolongar la vida útil del sello mecánico y prevenir fallas inesperadas.

Consideraciones importantes:

- Instrucciones del Fabricante: Siempre seguir las instrucciones específicas proporcionadas por el fabricante del sello mecánico para garantizar la instalación adecuada y segura.
- Profesionales Calificados: Si es necesario, involucrar a personal técnico o especializado en la instalación de sellos mecánicos para asegurar un procedimiento correcto y seguro.
- Normativas y Estándares: Cumplir con las normativas y estándares relevantes de la industria durante todo el proceso de instalación y operación del sello mecánico.

Siguiendo este procedimiento detallado y asegurándose de cumplir con todas las recomendaciones del fabricante, se puede optimizar la eficiencia y confiabilidad del sello mecánico en su aplicación industrial.

Selección del sello mecánico: Al momento de evaluar el cambio de sello mecánico se presentó un gran inconveniente que fue el tipo de sello que se necesita ya que al momento de solicitar una cotización se percató que es muy complejo, que no existe un sello mecánico alternativo u sustituto, ya que el John Crane tipo 9 es creado y adaptado para el uso único de la bomba centrífuga.

Elección de materiales: Elegir los materiales adecuados para el sello mecánico es crucial, ya que deben ser compatibles con los medios y las condiciones ambientales a las que estará expuesto el sello. Todo eso debido a que la condición medio ambiental es un tema importante ya que existen ciertas normativas nacionales que, en caso de ocurrir derrames de productos contaminantes, estos deben ser acumular para ser tratados y así poder desecharlos de manera normal.

Diseño para condiciones extremas: Si el sello mecánico estará operando en condiciones extremas, como altas presiones, temperaturas extremas o exposición a productos químicos corrosivos, el diseño debe tener en cuenta estas condiciones para garantizar un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada.

Instalación adecuada: Hay que asegurar que el nuevo sello mecánico pueda instalarse correctamente, con la medida adecuada y la alineación correcta, todo eso se debe hacer a través de un proyectista ya que es fundamental poder tener todas las medidas correctas para evitar desgaste prematuro y garantizar un funcionamiento suave.

Consideraciones de fricción y desgaste: El diseño del sello mecánico debe tener en cuenta los aspectos de fricción, lubricación y desgaste para garantizar un movimiento suave y duradero

entre las superficies en contacto, eso se debe contemplar para en nuevo diseño y así emplear de buena forma los planes API.

Cumplimiento de estándares internacionales: Es importante que el diseño del nuevo sello mecánico cumpla con los estándares internacionales de calidad y rendimiento para garantizar su eficacia y durabilidad, ya que el activo en cuestión pertenece a refinería lo cual debe cumplir con ciertos estándares a petición de los seguros asociados de la empresa.

El examen anticipado detectó el deterioro precoz de los anillos de desgaste en cuanto a un inconveniente frecuente en el subsistema de recolección de gases hidrocarburos de la bomba multietapa de la planta Coker. Ahora bien, esta falla se asocia con las exigentes y prolongadas horas de producción de esta máquina, generando un deterioro grande al sugerido por los fabricantes. Por lo tanto, se brindan ilustraciones particulares y se plantean alternativas según la experiencia en reparación en este sector.

Validación y Descarte de Hipótesis en el Proyecto de Investigación de ENAP

Hipótesis 1: Falta de capacitación

- Validada: se precisó que la ausencia de formación continua es un elemento importante en la concurrencia de problemas. Para abordar este problema, se requiere mejorar las capacidades de los trabajadores y optimizar las etapas de instalación.

Hipótesis 2: Falta de limpieza

- Validación parcial: La hipótesis se validó parcialmente, dado que los temblores mecánicos no provocan daños en el sello de forma permanente. Asimismo, podrían ocurrir escenarios vinculados con la operatividad de la máquina.
- Para valorar de forma completa la hipótesis, es importante llevar a cabo un examen constante que posibilite evidenciar si se generan los deterioros en la máquina.
- Finalmente, hay que guiarse por el mapa de monitoreo con el fin de valorar si tales elementos pueden dañar irreparablemente el sello mecánico. Esto posibilitará sostener si los aspectos funciones son causantes de los inconvenientes provocados.

Hipótesis 3: Optimización de la Logística

Validación: Esta hipótesis se validó de forma completa. Se reconoció el problema de transportar las bombas a centros de reparación centrales. Por lo tanto, se busca proponer un taller móvil, con inventarios oportunos para optimizar la funcionalidad del proceso de mantenimiento.

La validación de las hipótesis 1 y 3 se basó en el ACR, el comportamiento de la máquina de reparación y el objeto por optimizar la eficacia del activo. Los elementos que se proponen tienen la finalidad de sortear los inconvenientes de sellado de las bombas centrífugas, así como las formas de conservar las máquinas.

Soluciones basadas en mantenimiento:

- Capacitación del personal mecánico: aplicar un curso de formación continua para reemplazar este sello, lo que incluye ejercicios de colocación correcto, torque y aspectos de seguridad.
- Interpretación: esta formación disminuye las fallas humanas, lo que merma la posibilidad de fallos técnicos precoces del sello mecánico.

Taller móvil como solución estratégica:

- Reducción de Tiempos de Inactividad: El taller móvil posibilita resarcimientos in situ,
- Optimización de la Logística: suprimir el traslado de la máquina disminuye los costes vinculados con la logística.
- Mejora de la Eficiencia Operativa: los procesos de mantenimiento son más ágiles y se perfecciona la funcionalidad operativa.
- Acceso a Herramientas y Repuestos: posibilita a los técnicos llevar a cabo arreglos rápidamente.

Integración del Taller Móvil y la Instalación del Sello Mecánico:

- Taller móvil como soporte para la instalación: El taller móvil proporciona un espacio adecuado y equipado para realizar la instalación del sello mecánico de forma segura y eficiente.
- Acceso a herramientas y repuestos: El taller móvil asegura que los técnicos tengan acceso a las herramientas y repuestos necesarios para realizar la instalación del sello mecánico correctamente.
- Capacitación en el taller móvil: El taller móvil puede servir como un espacio para la capacitación del personal mecánico en las mejores prácticas de instalación del sello mecánico.

Propuesta de mejora del plan de mantenimiento:

- Revisión del programa de mantenimiento: valorar el programa actual de mantenimiento preventivo y predictivo, al detectar las zonas que requieren arreglo y acoplándolo en función de las demandas de la bomba multi-etapa.
- Implementación de técnicas de mantenimiento predictivo: Incorporar técnicas de monitorización predictiva, como el análisis de vibraciones, para detectar problemas de forma temprana.
- Optimización de la logística: Considerar la implementación de un taller móvil para facilitar las reparaciones in situ.

Implementar este tipo de capacitaciones se considera esencial para optimizar la capacidad de respuesta del activo e impedir problemas precoces en la bomba señalada, lo que posibilita mermar los gastos y disminuir la falta de continuidad operativa.

1.1. Resumen De Hipótesis Finales

El examen de los gastos y funcionalidad de dicho mantenimiento muestra alternativas capitales para perfeccionar los procedimientos y los recursos. Hoy en día, ENAP paga de forma anual 138 millones de pesos en sellos mecánicos, lo cual tiene en cuenta un gasto de mano de obra de \$576.000 por intervención, con un total de \$3.456.000 al año. De acuerdo con las estadísticas de John Crane, aproximadamente el 30% de las fallas de los sellos se deben a una instalación o limpieza inadecuadas, lo que señala un área crítica de mejora.

Una opción para reducir estos costos sería la capacitación del personal mecánico a través de los cursos proporcionados por el fabricante, lo que podría generar un ahorro potencial de 41 millones de pesos al año. La capacitación permitiría una instalación adecuada y una mejor práctica de mantenimiento, lo cual incrementaría la confiabilidad operativa de los equipos y reduciría la frecuencia de intervenciones costosas. Además, mejorar las condiciones de trabajo, como la instalación de un taller móvil, contribuiría a disminuir la contaminación cruzada, que es particularmente dañina para los sellos mecánicos, dado que son piezas altamente sensibles.

Llevar a cabo un taller móvil posibilita optimizar la logística de los trabajadores y darles rapidez a las acciones en el lugar de operaciones, reduciendo los tiempos de reparación. De esta manera, se mejora la funcionalidad de las operaciones y permitiría cumplir las hipótesis de optimización de procedimientos en materia de ahorro y generar confianza. Con relación a la colocación de los sellos, es pertinente guiarse cabalmente por las pautas de Crane, lo que garantiza una instalación excelente y brinda confianza en los equipos. Esto genera una durabilidad de las bombas, lo que reduce gastos operacionales.

Tabla 3.2 Costo total anual de cambio de sellos mecánico

Valor de sello mecánico nuevo	Fallas al año
\$23.065.627	6
Total	\$138.393.762

Fuente: elaboración propia

referencia para arreglos en el plan a medida que se detectan patrones de errores o zonas de optimización.

3.3.1. Fases de Implementación

Esta aplicación se estructuró en distintas fases para salvaguardar un proceso sistemático:

- Fase 1: Diagnóstico Inicial

Inspección de Equipos: Se realiza una valoración pormenorizada de la situación reciente de los sellos mecánicos y las bombas concernientes al sistema.

Identificación de Recursos Necesarios: Se detectan y adquieren los recursos necesarios, lo que incluye instrumentos avanzados, repuestos críticos y materiales de sellado.

- Fase 2: Capacitación del Personal

Programas de Capacitación Específica: se desarrollan programas de capacitación para los técnicos y operarios que están a cargo de la manutención de estas máquinas, centrados en la instalación y arreglo, dominio de instrumentos y prácticas seguras de trabajo.

Evaluación del Conocimiento Adquirido: Se examina la episteme adquirida mediante exámenes teórico-prácticos para salvaguardar las habilidades de los trabajadores.

- Fase 3: Ejecución del Mantenimiento

Implementación del Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo: Se aplican los recursos estratégicos de conservación predictiva y preventiva vinculadas durante las etapas previas, lo que incluye la programación de monitoreos constantes, la efectuación de exámenes de ultrasonido y vibración, entre otros.

Documentación y Registro: Cada acción de mantenimiento se documentará de forma pormenorizada, por lo que se registran las tareas ejecutadas, las piezas sustituidas, entre otros.

- Fase 4: Evaluación y Ajustes

Revisión del Desempeño: Se evalúa el rendimiento del sistema posterior a la aplicación inicial para detectar arreglos pertinentes en las estrategias de mantenimiento.

Optimización Continua: Se acoplan las fases de conservación según lo aprendido y los hallazgos, lo que asegura una optimización constante en la operatividad y conservación de las máquinas.

3.3.2. Roles y Responsabilidades

Para llevar a cabo la idónea aplicación del plan, se designan funciones y delegaciones concisas a todos los integrantes:

- Gerente de Mantenimiento: debe monitorear la valoración total del plan de mantenimiento. Esto requiere la correspondencia entre distintos departamentos, la admisión de bienes materiales y de activos, y la toma de decisiones elementales en el proceso.
- Ingeniero de Mantenimiento: se encarga de ejecutar y actualizar los procedimientos de mantenimiento, llevar a cabo monitoreos técnicos y detecciones necesarias.
- Supervisores de Campo: se encargan de la efectucción día a día de las labores de arreglos preventivos, lo que incluye la sistematización de labores, monitoreo del personal técnico, entre otros.
- Técnicos de Mantenimiento: realizará las labores de mantenimiento, lo que incluye el monitoreo, arreglos y sustitución de las piezas.
- Personal de Logística: deben asegurarse de que todos los materiales, instrumentos y suministros adecuados estén a disposición al momento de requerirse, lo que debe abordar la administración del inventario y la correspondencia con proveedores.

De esta manera, se ofrece un enfoque sistematizado para optimizar la confianza y operatividad excelente de los sistemas de bombas y sellos mecánicos en ENAP. Con fases claras y roles bien definidos, el plan asegura que todas las partes involucradas comprendan sus responsabilidades y contribuyan a alcanzar los objetivos de mantenimiento establecidos.

Para el desarrollo de las mantenciones propuestas, se sugiere aplicar la siguiente checklist:

Inspección De Sistema De Bombas Y Sellos Mecánicos

Revisado por:

Fecha:

Sistema:

Supervisor:

Tabla 3.4 Checklist propuesta

Ítems	Instrumentos	OK	Obs.
1. Inspección General			
1.1	Estado del sello mecánico		
1.2	Alineación del eje		
1.3	Estado de los rodamientos		
1.4	Nivel de vibración		
1.5	Condición del acoplamiento		
1.6	Estado de las juntas y empaques		
1.7	Fugas en el sistema		
1.8	Condición del aceite lubricante		
1.9	Nivel de aceite en la caja de rodamientos		
2. Instrumentación y Controles			
2.1	Manómetro de presión en la bomba		
2.2	Transmisor de temperatura en rodamientos		
2.3	Transmisor de presión en la succión		
2.4	Medidor de caudal		
2.5	Sensor de temperatura en el sello mecánico		
2.6	Panel de control del sistema de bombas		
2.7	Indicador de flujo de refrigerante		
2.8	Alarma de sobrecalentamiento		
3. Sistema de Refrigeración			
3.1	Nivel de refrigerante en el sistema		
3.2	Condición de la bomba de refrigeración		
3.3	Condición del intercambiador de calor		
3.4	Temperatura de salida del refrigerante		
3.5	Filtros de refrigerante limpios		
4. Sistema de Lubricación			
4.1	Nivel de aceite lubricante		
4.2	Condición de la bomba de lubricación		
4.3	Estado de los filtros de lubricante		
4.4	Temperatura del aceite		
5. Inspección de Seguridad			
5.1	Estado de las protecciones mecánicas		
5.2	Funcionamiento de los dispositivos de parada de emergencia		
5.3	Verificación de etiquetas y señales de seguridad		
5.4	Revisión de sistemas de bloqueo y etiquetado (LOTO)		
6. Condición de Componentes Auxiliares			
6.1	Estado de las válvulas de control		
6.2	Condición de las líneas de succión y descarga		
6.3	Estado de las tuberías de refrigeración		
6.4	Integridad de las conexiones eléctricas		

Observaciones:

A continuación, se presentan las tablas asociadas al plan y sus actividades:

Tabla 3.5 Plan de actividades

TAREA - ÁREA 1	FREC	HRS	PER
Mantenimiento y pruebas del			
sistema de bombas			
Verificación y Medición de	C/M	1	1
presiones y temperaturas en la succión y descarga			
Verificar niveles de aceite	C/M	0.5	1
en la caja de rodamientos			
Inspección y mantenimiento de	C/M	0.5	1
conexiones de tuberías y válvulas			
Inspección y mantenimiento de	C/M	1	1
dispositivos de instrumentación (medidores de presión, caudal y temperatura)			
Mantenimiento inspección y	FREC	HRS	PER
pruebas de sellos mecánicos			
Verificación y medición de temperatura en los	C/S	1	1
sellos mecánicos			
Inspección y mantenimiento de instrumentación	C/S	1	1
asociada al sistema de sellado (sensores de temperatura, detectores de fugas)			
Inspección y mantenimiento de la alineación del	C/S	2	1
eje y acoplamiento de la bomba			
Inspección y mantenimiento del sistema de	C/S	2	1
refrigeración de los sellos			
Inspección y mantenimiento del sistema de	C/S	2	1
lubricación			
Inspección y calibración de sensores de nivel y	C/S	3	2
presión en el sistema de succión y descarga			
Verificación de alarmas y dispositivos de	C/S	2	2
seguridad del sistema			

Cada tarea descrita en la tabla tiene un propósito específico orientado a la prevención de fallas y al aseguramiento del correcto funcionamiento de los componentes críticos del sistema.

Esta forma de verificar y medir la temperatura de tales sellos es una operación que se tiene que realizar de manera semanal, cuya labora dura una hora y posibilita identificar novedades en el nivel de calor que podrían generar fallas. Por lo tanto, es pertinente conservar los lineamientos estándar de estas operaciones. El examen y mantenimiento de las herramientas vinculadas con este sistema de sellado, como sensores de temperatura y detectores de fugas, se lleva a cabo semana por semana, lo que permite trabajar sin problemas.

El sistema de refrigeración de los sellos necesita cuidados semana por semana. Al dedicar un par de horas de actividades, este sistema mantendrá los sellos a una temperatura adecuada, así no se recalentará el sistema y se evitan errores colosales. Asimismo, se debe vigilar el sistema de lubricación. Dicha labor, semanal y de dos horas de duración, posibilita que todos los elementos del sistema tengan una lubricación idónea, lo que disminuye la fricción y el deterioro, lo que prolonga la permanencia de los sellos, entre otros. Por otro lado, la calibración de sensores de nivel y presión en el sistema de succión y descarga se estima como una labor de más tiempo, al demandar tres horas y la intervención de dos operarios.

En último lugar, la comprobación de alarmas y dispositivos de seguridad resulta capital para la funcionalidad segura de la zona de labores. Esta labor, cuya duración es de dos horas semanales y solicita la participación de dos operarios, posibilita que estos sistemas sean oportunos para cualquier evento inusual.

3.4. Monitoreo Y Evaluación

El apartado de “Monitoreo y Evaluación” en un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) resulta elemental para hacer que los recursos aplicados pueden ser efectivos y que lo planteado pueda cumplirse cabalmente. Por tal razón, se dividió esta sección en dos partes: las estrategias de monitoreo y los indicadores clave de desempeño (KPI).

Estrategias de Monitoreo: se realizan para monitorear continuamente la eficacia del plan de mantenimiento aplicado, lo que tienen en cuenta la revisión de las labores de conservación de los equipos y la detección precoz de novedades que señalen inconvenientes potenciales en las máquinas.

Para ello, es pertinente recurrir a aparatos tecnológicos de revisión en tiempo real, como sensores de temperatura y vibración, lo que posibilita un monitoreo 24 horas de la situación de estos sellos, así como otros elementos de valor. Igualmente, los análisis planificados y constantes de la información histórica de reparaciones y funciones permite detectar patrones de errores.

Indicadores de Desempeño Clave (KPI): Para valorar el éxito del plan de mantenimiento, hay que determinar KPI que posibilitan cuantificar la eficacia de las estrategias implementadas. A continuación, se exponen los más relevantes:

- Disponibilidad del Equipo (AE): Este KPI cuantifica el valor de tiempo en que la máquina está en operación y disponible para su empleo. Una disposición elevada señala que el plan de mantenimiento funciona como debe ser y que los inconvenientes no planificados son mínimas.
- Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF): muestra el nivel de confianza del equipo y se calcula como el tiempo regular que va entre errores continuos.

- Tiempo Medio de Reparación (MTTR): cuantifica el tiempo estándar que se requiere para arreglar una máquina posterior a un daño. Un MTTR reducido señala que los procesos de mantenimiento son óptimos y que el personal se encuentra bien capacitado para ejecutar arreglos rápidos y efectivos.
- Costo de Mantenimiento por Unidad de Producción: valora el nivel económico de dicho plan al cuantificar el valor completo de la manutención en función de la producción derivada.
- Número de Paradas No Planificadas: Este KPI indaga la asiduidad de estorbos no planeadas en la operatividad de la máquina. La disminución de estas es una meta del RCM.

Cuando se implementan estos factores es posible que este plan cumpla con las metas de optimizar la confiabilidad de los activos del sitio de trabajo, lo que contribuye a la frecuencia de las operaciones, la mejor distribución de los recursos y la disminución de los gastos vinculados con los daños y arreglos.

RECOMENDACIONES PARA MEJORA CONTINUA

La efectividad de un plan de mantenimiento permite acoplarse y crecer en función de los elementos operaciones y las vivencias almacenadas. Por lo tanto, se sugiere monitorear y tener actualizaciones de este plan de forma constante, lo que posibilita perfeccionar las recurrencias de mantenimiento, monitoreo, arreglos y organización de las máquinas críticas en función de su rendimiento.

El monitoreo predictivo, entre otros, optimiza la identificación oportuna de errores y posibilita una ejecución apropiada de los mantenimientos, lo que reduce gastos y tiempos de interrupciones. además, la formación constante de los trabajadores facilita el fortalecimiento de las habilidades y conocimientos técnicos y prácticos sobre estos instrumentos, mejorando el ejercicio profesional y la durabilidad de los equipos.

Asimismo, desarrollar sistemas de organización del conocimiento permite que se hagan intervenciones más precisas y detalladas, al mejorar la capacidad de respuesta para las decisiones. Para ello, es pertinente contar con inventarios rigurosos que registren lo necesario para ejecutar acciones inteligentes.

El seguimiento de indicadores clave de desempeño (KPI) como la disponibilidad del equipo, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y los costos de mantenimiento posibilita valorar y acoplar el plan según los hallazgos verdaderos. En último lugar, estimular una cultura de optimización constante mediante estímulos y auxilio interdepartamental enriquece el carácter competitivo y la permanencia funcional a futuro.

CONCLUSIONES

Esta investigación logró cumplir con los objetivos planteados al abordar de manera integral las fallas recurrentes en las bombas centrífugas de la planta Coker de ENAP Aconcagua, específicamente en los sellos mecánicos, el cual logro aportar de manera notable con la optimización del subsistema en cuestión a través de procedimientos de RCM.

Mediante la metodología propuesta y aplicada, el cual incluyó el uso de herramientas como el FMECA (Análisis de Modos y Efectos de Fallas Críticas) y el RCA (Análisis de Causa Raíz), logro identificar los activos más críticos mediante diagramas de dispersión logarítmica.

A través del análisis realizado en los modos de falla críticos se determinó que el 30 % de las fallas se debe a los problemas de la instalación de los sellos mecánicos, en este punto fue crucial el empleo de ACR, ya que esto permitió entender los factores que generaban esta falla, por lo cual, se aplicaron medidas correctivas, dando a lugar a la propuesta de solución.

Esta propuesta se evaluó su factibilidad económica, en cual se estableció que el costo de la adquisición de un sello mecánico nuevo corresponde a un valor aproximado de 640,7 UF, mientras que las reparaciones pueden variar entre 228 y 457 UF, dependiendo del nivel de intervención requerido.

Por lo cual basado en lo analizado tanto de manera sistemática y económicamente, se determina la importancia de poder implementar estrategias de mantenimiento que pueda maximizar la vida útil de los equipos, en específico de los sellos mecánicos, con el objetivo de reducir costos operativos. La incidencia de este planteamiento se traduce en la optimización de la confiabilidad y la correcta funcionalidad de las máquinas, al disminuir significativamente el tiempo de interrupción y mermar las ausencias funciones producto de daños imprevistos.

En esa medida, la aplicación de intervenciones de prevención, cimentadas en instrumentos de vanguardia de vigilancia, aumentó la disposición de los activos y mejoró el empleo de los bienes materiales y humanos.

Con relación a las sugerencias, es categórico que la zona de trabajo conserve un monitoreo constante de este plan, al ajustar los recursos estratégicos en función de los hallazgos y los recursos tecnológicos. Es recomendable continuar con las formaciones continuas de los trabajadores para que cuenten con los conocimientos actualizados sobre estos equipos. Asimismo, se sugiere examinar la alternativa de aplicar un sistema de vanguardia de administración de mantenimiento, al brindar estados más previsorios y detallados de las máquinas de producción y sistemas.

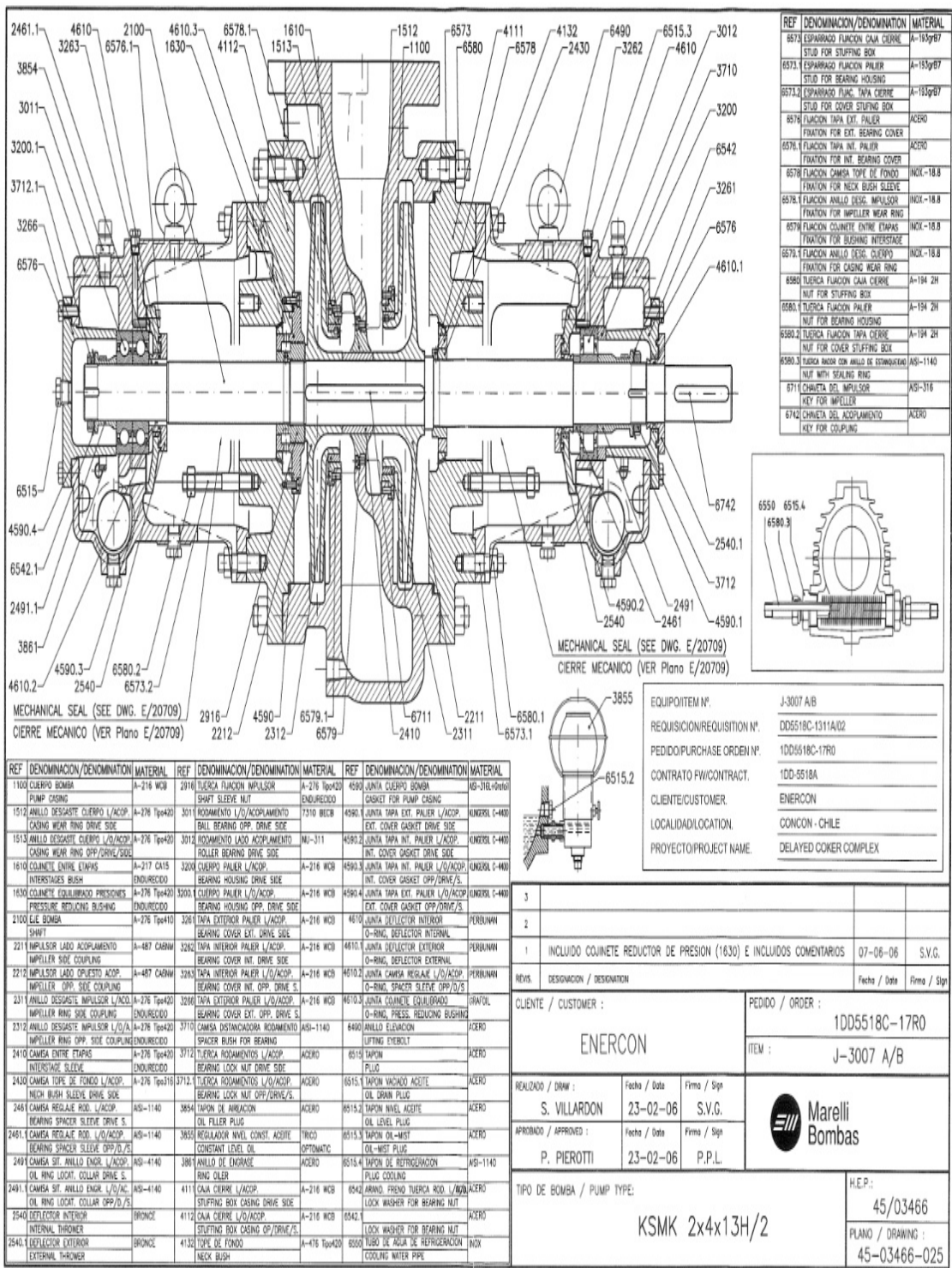
En suma, hay corrientes de investigación futuras que pueden aportar al mejoramiento constante de estos procedimientos, por lo que se plantea llevar a cabo investigaciones que ahonden alrededor de la inmersión de recursos tecnológicos poderosos para estar a la altura del mercado competitivo y optimizar operaciones, lo que reduce gastos económicos y aumenta la productividad. Por otro lado, es recomendar explorar nuevas aleaciones y materiales que brinde una firmeza más prolongada a la corrosión y al deterioro en condiciones operativas extremas. Esto posicionaría a la

planta en cuanto un modelo del acoplamiento de tecnologías de vanguardia y duraderas en el sector petroquímico.

BIBLIOGRAFÍA

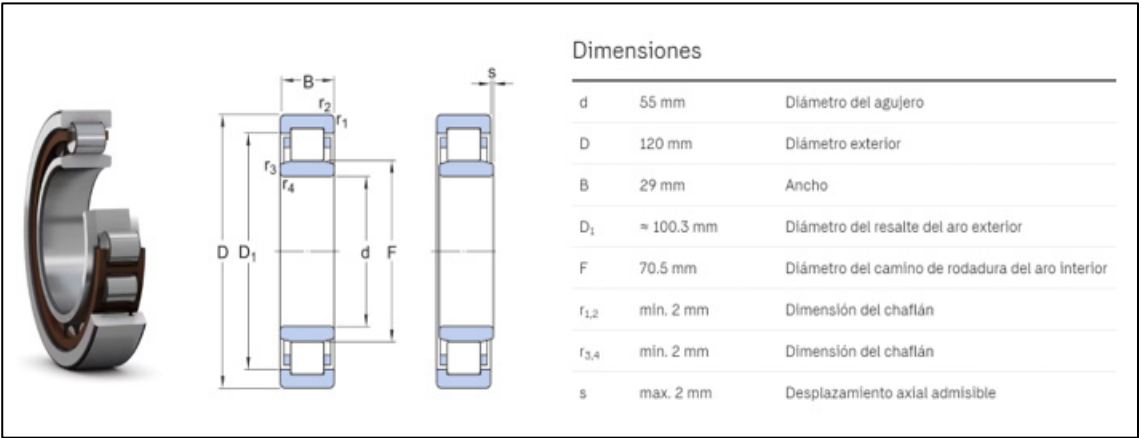
- Lange, K., Chrystle, D., & Leggett, S. (2001). *ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS*.
Obtenido de Corporación General Motors:
https://www.academia.edu/36022160/An%C3%A1lisis_de_Modos_y_Efectos_de_Fallas_Potenciales_AMEF_Tercera_Edici%C3%B3n?auto=download
- Christiansen, B. (04 de 2024). *Cómo realizar un análisis de criticidad para priorizar el mantenimiento de activos*. Obtenido de <https://limblecmms.com/blog/how-to-perform-criticality-analysis/>
- ENAP. (2024). *Refinación*. Obtenido de <https://www.enap.cl/nuestras-operaciones/refinacion-y-comercializacion-rc/procesos-de-transformacion/refinacion>
- Figueroa Pérez, J. F. (2011). *Seminario de sellado de fluidos: Funcion de los sello mecanicos*.
Obtenido de Espol:
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/17106/1/ProyectoFigueroa.pdf>
- Ns Energy. (28 de 01 de 2021). *Refinería ENAP Aconcagua*. Obtenido de
<https://www.nsenergybusiness.com/projects/enap-aconcagua-refinery/?cf-view>
- Sundyne. (2024). *Rendimiento confiable y de alta eficiencia con bombas API de alta ingeniería para servicios críticos upstream y downstream*. Obtenido de
<https://www.sundyne.com/products/marelli-pumps/>
- Tabares, A. (2012). *DISEÑO DE UN PLAN LOGÍSTICO DE Servicios de mantenimiento para una compañía en el campo del aire acondicionado*. Obtenido de
<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3064/T.G.%20Andrea%20Carolina%20Tabares%20E.pdf?sequence=1>
- Tavares, L. (08 de 2020). *Indices Clase Mundial*. Obtenido de Predictiva21:
<https://predictiva21.com/4-2-indices-clase-mundial-mantenimiento/>

Anexos

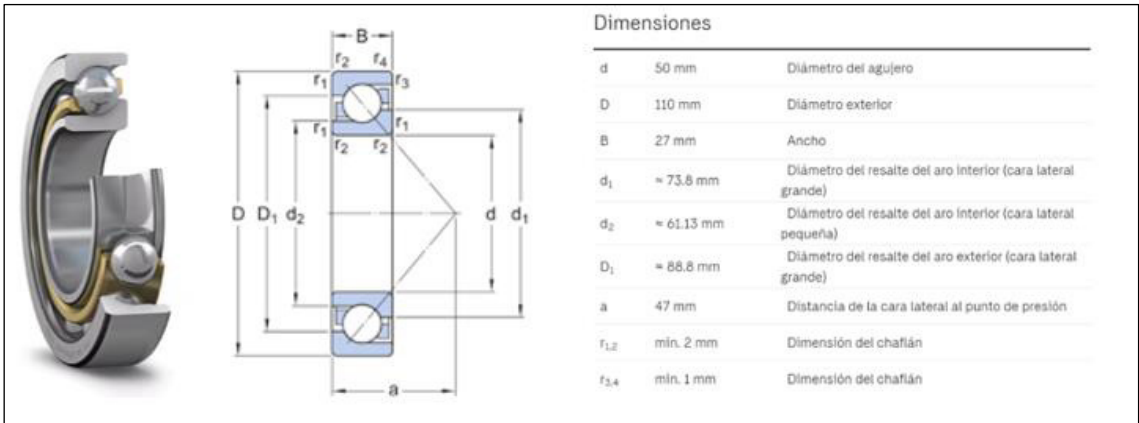


ANEXO 1 "Data sheet Bomba Marelli KSMK"
(Fuente: *Manual de bomba ENAP, D. Mecánico*)

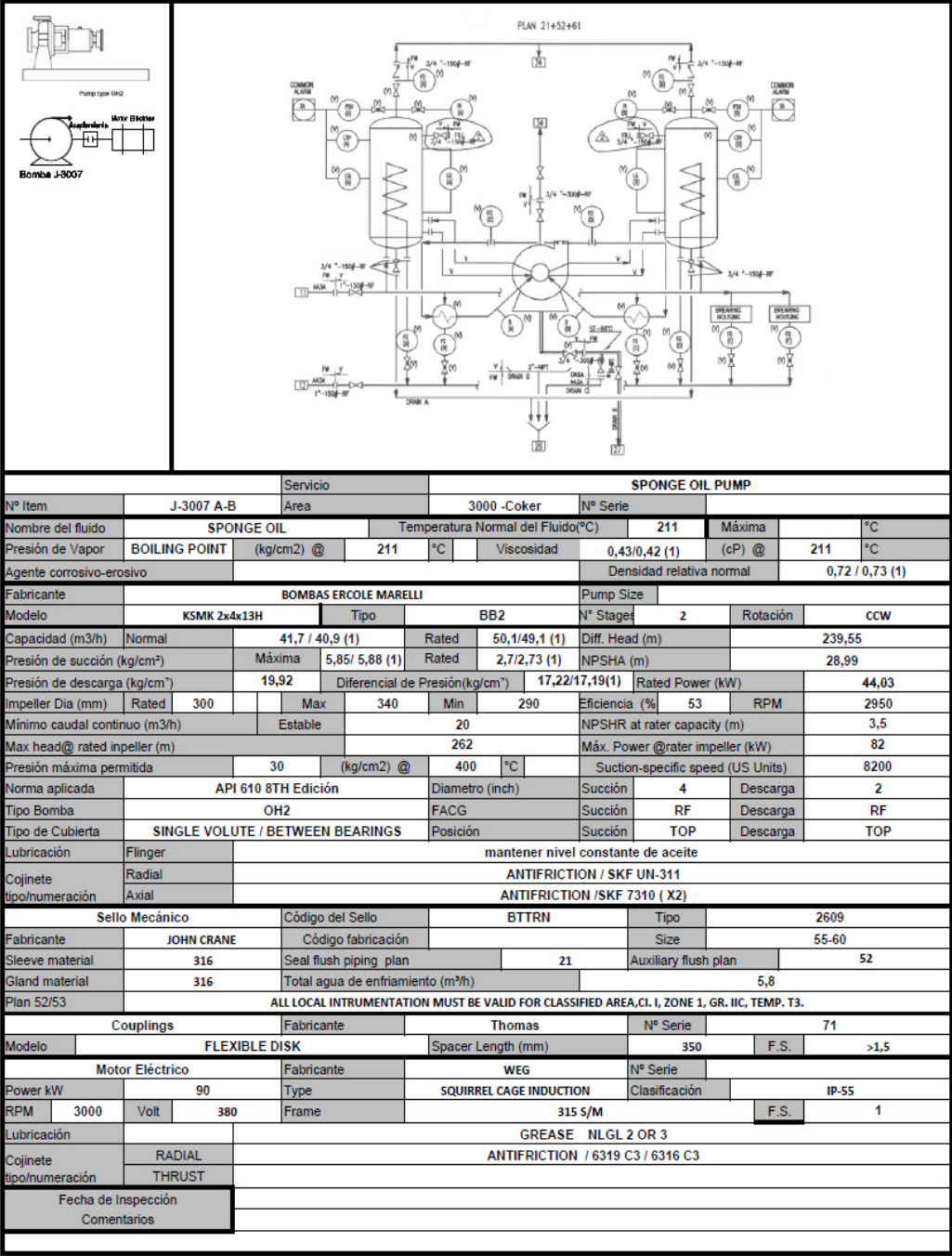
UN 311



7310



(Fuente: pagina SKF)

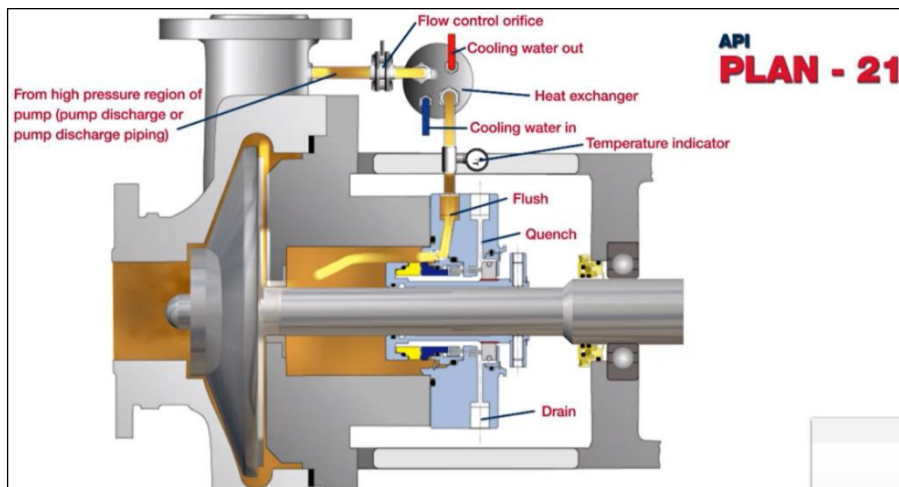
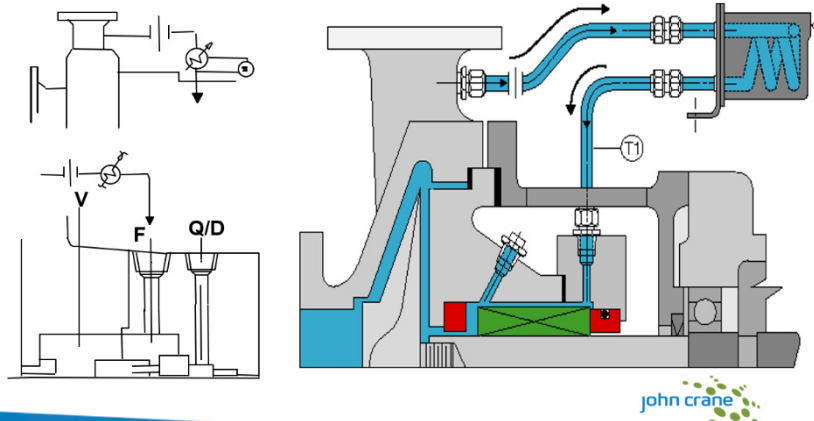


ANEXO 3 "Data sheet bomba Marelli KSMK"

(Fuente: Manual de bomba ENAP, D. Mecánico) (Fuente: Manual KSMK ENAP refinería)

Plan API 21

- Circulación desde la descarga hasta la cavidad de sellado pasando por una placa orificio y un intercambiador de calor.

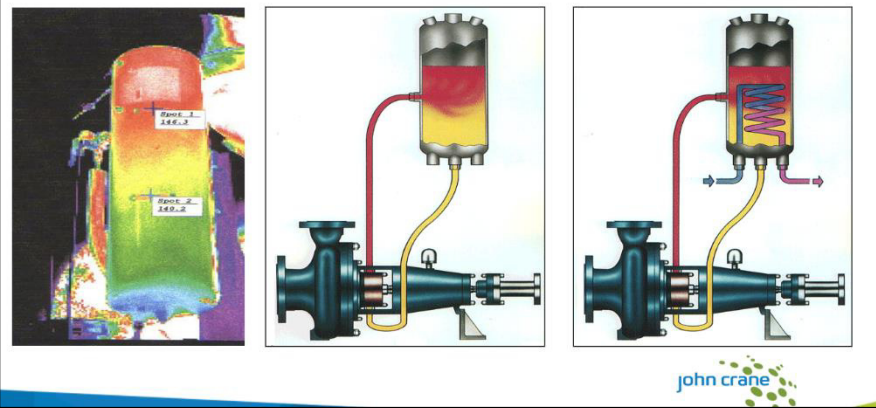


ANEXO 5 "Descripción de planes API instalados"

(Fuente: John Crane)

Planes API 52 y 53A
Características del Reservorio

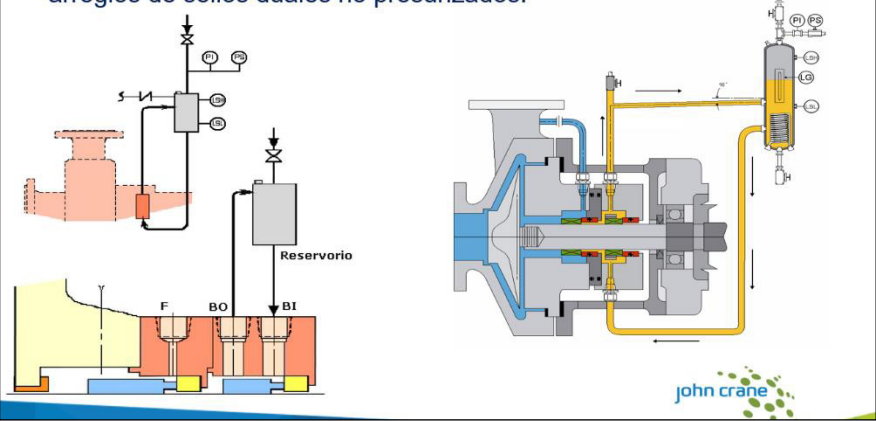
Efecto Termosifón



ANEXO 6 "Descripción reservorio plan API 52"
(Fuente: John Crane)

Plan API 52

- Circulación forzada de líquido amortiguador contenido en un reservorio, por un anillo de bombeo o por efecto termosifónico, para arreglos de sellos duales no presurizados.



ANEXO 7 "descripción de planes API instalados"
(Fuente: John Crane)

Fecha	Nro de Cotización
28/06/2024	948399 / 1
Su Referencia	
COTIZ. SELLOS NUEVOS	

Cotización



Atención SR. JAIME CAZORLA

Para:
8775650A
ENAP REFINERIAS S.A.
Avenida Borgoño 25777
CONCON - VALPARAISO
CHILE

John Crane Chile S.A.
RUT 99517650-5
Av. Américo Vespucio | El Cortijo |
Conchali 2542
SANTIAGO
CHILE

Contamos con Certificaciones ISO 9001, ISO 14001, e ISO 45001. Certificados a su disposición.

SU REFERENCIA:
Solicitud Cotización Juego de Sellos Mecánicos Bombas J-3007 A-B

Precios cotizados en: CLP

Ntro	Ntro Nro de Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Valor Neto	Entrega *
10	HSP10400081 TIPO 609/609 M55 J-3007 Lado Libre Sello Mecánico doble LADO LIBRE Plano: HSP-1040008-1 Código ENAP: 5155492 TAG: J-3007 A-B Lado Libre	1 Unidad	23.065.627,00	23.065.627,00	14 Semana(s)*
	Sello mecánico Doble, Tipo 609, Tamaño Eje 55 mm. Cod. de Materiales: O39 F51 1 O39 O95 1 316/MONEL O39 F51 1 O39 O95 1 316/MONEL BOMBA TAG: J-3007 A-B Lado Libre N-Plano: HSP-1040008-1 Código ENAP: 5155492				
20	HSP10400091 TIPO 609/609 M60 J-3007 Lado Acople Sello Mecánico Doble J-3007 A-B L. ACOUPLE Plano: HSP-1040009-1 Código ENAP: 5159218 TAG: J-3007 A-B Lado Acople	1 Unidad	23.065.627,00	23.065.627,00	14 Semana(s)*
	Sello mecánico Doble, Tipo 609, Tamaño Eje 60 mm. Cod. de Materiales: O39 F51 1 O39 O95 1 316/MONEL O39 F51 1 O39 O95 1 316/MONEL BOMBA TAG: J-3007 A-B Lado Acople N-Plano: HSP-1040009-1 Código ENAP: 5159218				

Cond. Envio:	DDP Su Planta	Subtotal (Bienes y Servicios)	46.131.254,00
Cond. Pago:	30 DIAS	Otro	0,00
Valido hasta:	28/07/2024	Valor Total	CLP 46.131.254,00
		Impuestos	8.764.938,26
		Valor Total Incl. Imp.	CLP 54.896.192,26

* Tiempo estimado de entrega luego de recibida su orden.

ANEXO 8 "Cotización sello mecánico"
(Fuente: John Crane)